

## ■9 群（電子材料・デバイス）-2 編（金属と超伝導体）

### 3 章 酸化物系超伝導デバイス

（執筆者：向田昌志）[2011年7月受領]

#### ■概要■

酸化物超伝導体は、物質構成元素が4種類以上と多く、超伝導体本来の高い超伝導転移温度（TC）を発現させるためには、それら構成元素の厳密な組成制御が重要である。更に、酸化物超伝導体は金属系超伝導体に比べて、コヒーレンス長が極端に短く、 $d_{x_2-y_2}$ の対称性のために、酸化物系超伝導デバイスに用いる薄膜の高品質化、配向・面内方位制御が不可欠である。そのような厳しい制約条件の中、金属系超伝導デバイスを凌駕する酸化物系超伝導デバイスを実現することは、更に困難を極めるところであった。しかし、動作温度として、液体窒素温度以上も可能であるという魅力の大きさは、これを目指した研究者の多さが物語っている。

困難を極めた高品質酸化物超伝導薄膜の実現は、その後酸化物、窒化物系機能材料薄膜のエピタキシャル成長、電子デバイスの技術的礎となり、今日に至っている。高品質酸化物超伝導薄膜実現後、それを用いた酸化物系超伝導デバイスは、金属系超伝導デバイスと類似のSFQ, SQUIDなどの接合系デバイスと高温超伝導体の超伝導転移温度の高さ、エネルギーギャップの大きさなどを活かした超伝導マイクロ波デバイスや超伝導テラヘルツフォトンクスにも発展していった。本章では、高品質酸化物超伝導薄膜実現のために行われてきた技術的マイルストーン、SQUID、超伝導マイクロ波デバイス、超伝導テラヘルツフォトンクスの特筆すべき技術革新、進展状況について紹介する。

#### 【本章の構成】

本章では、まず、酸化物系超伝導デバイスの酸化物系超伝導デバイスの作製技術（3-1節）について述べ、続いて、具体的な応用デバイスとその応用として、酸化物系 SQUID とその応用（3-2節）、超伝導マイクロ波デバイスとその応用（3-3節）、及び超伝導テラヘルツ応用（含む SSPD：超伝導単一フォトン検出器）（4-4節）について述べる。

## ■9 群 - 2 編 - 3 章

### 3-1 酸化物系超伝導デバイスの作製技術

(執筆者：田辺圭一) [2009年4月受領]

本項では銅酸化物系高温超伝導材料を用いた超伝導デバイス作製の際の基本となる薄膜作製技術，ジョセフソン接合作製技術，及び薄膜積層構造を利用した集積回路作製技術について概説する。

#### 3-1-1 薄膜作製技術

デバイス用の銅酸化物系超伝導薄膜としては，結晶粒の  $c$  軸が基板に垂直でかつ  $a$  軸あるいは  $b$  軸の向きが揃った 2 軸配向の多結晶薄膜が基本的に用いられる。また，材料としては，90 K を超える臨界温度  $T_c$  をもつ 2 軸配向膜が比較的容易に形成でき，Tl や Hg などの毒物を含まない YBCO 系材料  $REBa_2Cu_3O_y$  ( $RE$  は Y あるいは Nd, Sm, Ho などの希土類元素) にほぼ収束している。

YBCO 系超伝導薄膜は，パルスレーザー蒸着 (Pulsed laser deposition : PLD) 法，スパッタ法，共蒸着法 (あるいは MBE 法)，有機金属化学気相蒸着法で作製できるが，デバイス用には前三者が主として用いられる (図 3・1 参照)。良質の超伝導薄膜を得るためには，カチオン組成を 1 : 2 : 3 の比率にほぼ合わせるとともに，十分な量の酸素 ( $y \geq 6.9$ ) を薄膜中に導入する必要がある。また，結晶成長・配向を促進するため，原子のマイグレーションのよい分解曲線に近い比較的低酸素の条件下でまず薄膜成長を行い，冷却時に必要量の酸素を導入する方法が用いられる<sup>1)</sup>。

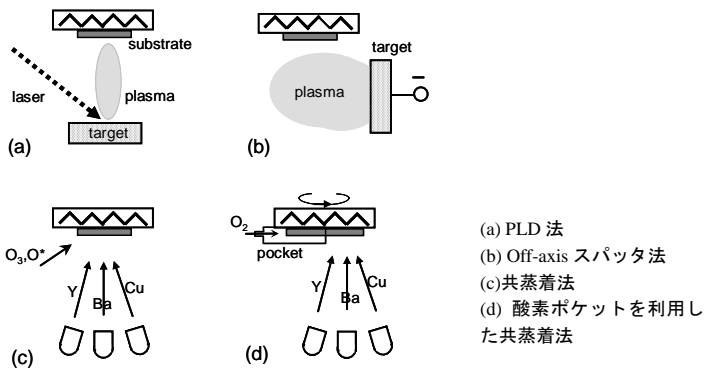


図 3・1 酸化物系高温超伝導薄膜の代表的な薄膜作製方法

PLD 法は，元素組成の制御が容易で成膜速度も比較的速いため，実験室レベルでは最もよく用いられるが，Droplet と呼ばれる表面粒子が形成されるため，薄膜積層構造作製には適さない。

スパッタ法では，高エネルギー粒子の基板衝撃による組成ずれを防ぐため，ターゲットを基板に対し 90 度の位置に置いた Off-axis 配置が主流である (図 3・1 (b))。成膜速度は遅いが，

PLD 法より再現性や表面平坦性に優れるため、集積回路作製に適している。共蒸着法は、組成制御技術が必要であるが、超伝導特性に優れた薄膜が得られ、成膜速度も非常に速い。

最も低酸素雰囲気中で成長が行われる共蒸着法では、オゾンや原子状活性酸素を用い酸化を行う方法に加え、まず金属元素を共蒸着した後に高酸素圧のポケットで逐次酸化を行う方法(図 3・1 (d))が開発されている<sup>2)</sup>。後者の方法は、大面積化(最大 9 インチ径)や高速化に有利であり、この方法で作製した薄膜は実際に市販されている。基板としては、 $\text{SrTiO}_3$  や  $(\text{LaAlO}_3)_{0.3}(\text{SrAl}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3)_{0.7}$ ; LSAT などのペロブスカイト酸化物や  $\text{MgO}$ 、 $\text{CeO}_2$  パツファ層付きサファイアなどの単結晶基板が用いられているが、マイクロ波デバイスや単一磁束量子(SFQ)デバイスなどの高周波、高速デバイスには誘電率と誘電損失の小さな  $\text{MgO}$  (非誘電率 $\sim 10$ ) やサファイア(非誘電率 $\sim 9\text{--}11$ ) が用いられる。

薄膜の加工は、複雑な化学組成のため反応性イオンエッチング法は使用できず、主としてイオンミリング法が用いられる。この際、基板温度上昇による酸素抜けを防ぐため、基板の冷却効率に十分注意する必要がある。

### 3-1-2 ジョセフソン接合作製技術

銅酸化物系高温超伝導材料は、コヒーレンス長が a, b 軸方向で 2 nm 程度、c 軸方向には 0.2 nm と極めて短い、格子歪みなどによりキャリアが欠損し絶縁体化する、超伝導ギャップが d 波対称性をもつなどの理由により、低温超伝導体の場合のような理想的な超伝導体-絶縁体-超伝導体(SIS)トンネル接合を作製する技術は開発されていない。一方、高傾角の結晶粒界は、転位列や格子歪みのためキャリアが欠損し、いわゆる弱結合型ジョセフソン接合として働く。図 3・2 には現在も用いられている種々のジョセフソン接合の構造を模式的に示すが、結晶粒界を利用した粒界ジョセフソン接合と、人工的なバリア層を用いた接合の 2 種に大きく分けることができる。

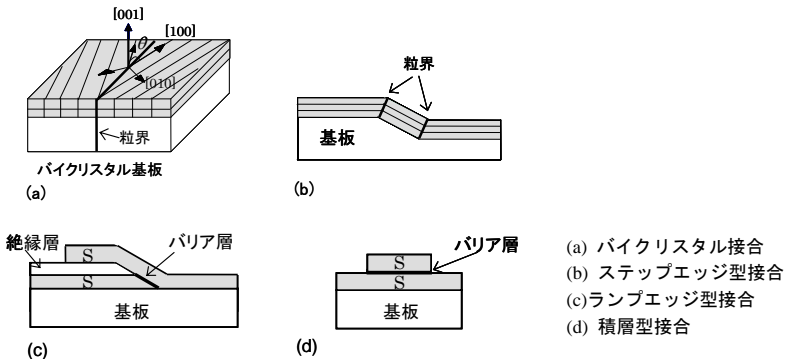


図 3・2 代表的なジョセフソン接合の構造

粒界ジョセフソン接合には、 $\text{SrTiO}_3$ 、LSAT、 $\text{MgO}$  などの単結晶をある傾角で貼り合わせた基板を用いるバイクリスタル接合、基板段差を利用したステップエッジ接合、また材料による結晶配向の違いを利用し薄膜積層で人工的に高傾角粒界を作り出すバイエビタキシャル接合などがある。バイクリスタル接合やステップエッジ接合は、超伝導量子干渉素子(SQUID)

の作製に多く用いられている。

バイクリスタル基板としては、図 3・2(a)のように二つの単結晶の結晶軸を[001]軸の周りに回転し貼り合わせた[001]-tilt 基板が主として用いられる。接合の臨界電流密度  $J_c$  は傾角に対しほぼ指数関数的な低下を示し<sup>3)</sup>、傾角 24 度から 36.7 度の間のものが利用されている。ステップエッジ型接合の基板としては、以前は SrTiO<sub>3</sub> も用いられたが、現在では MgO が主流となっている。

MgO 基板にイオンミリングで加工された 20~30 度の傾斜面には、YBCO 系薄膜の c 軸が垂直になるように成長するため、段差の上と下の部分に高傾角粒界が形成されるが、基板のオーバーエッチにより下部における粒界の発生を防ぐこともできる。段差の上では、YBCO 系薄膜が[100]軸の周りに回転した[100]-tilt 粒界が形成されている。粒界ジョセフソン接合の  $J_c$  は傾角だけでなく、薄膜の膜質にも大きく依存する。また、 $J_c$  のばらつきは大きく(標準偏差で 20~30 % 以上)、集積回路の作製には適さない。

一方、人工バリアを用いる接合の構造としては、薄膜を c 軸方向に積層したいわゆる積層型接合と薄膜斜面上にバリア層を形成するランプエッジ型接合があるが、コヒーレンス長の比較的長い超伝導膜の a, b 軸方向に電流が流れる後者の方が特性の制御の観点では有利である。

また、バリア層の形成方法としては、超伝導体と同じ構造をもつが絶縁体に近い性質をもつ PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> などの薄膜を 5~15 nm 程度の厚みで堆積する方法と、超伝導膜の表面を改質する方法がある。後者は界面改質型接合 (Interface-engineered junction あるいは Interface-modified junction) と呼ばれ<sup>4)</sup>、ジョセフソン接合の性能指標である  $I_c R_n$  積 ( $I_c$  は最大ジョセフソン電流値、 $R_n$  は接合抵抗) や  $J_c$  の均一性の点で優れる。

図 3・3 には、界面改質型ランプエッジ接合の作製プロセスを模式的に示す。超伝導薄膜、絶縁層薄膜を積層した後、イオンミリングにより傾斜角 30 度程度の斜面を形成する。次に、基板に垂直に Ar イオンを加速電圧 300~500 V 程度で照射し、超伝導膜斜面上に Cu の欠損

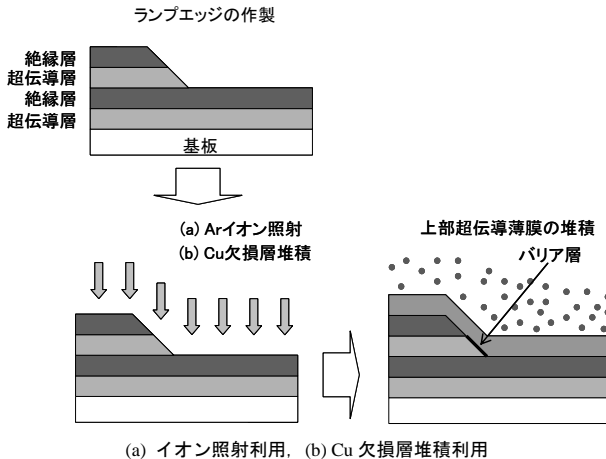


図 3・3 界面改質型ランプエッジ接合の作製プロセス

した薄いアモルファス層を形成する．更に，上部超伝導薄膜を堆積する際に，このアモルファス層の再結晶化と原子拡散により非超伝導層がマイクロに分散した界面が形成され，ジョセフソン接合として働く．イオン照射の代わりに，超伝導層に比べ Cu の欠損した膜を薄く堆積する方法も開発されている．この場合にも，界面の再構成が起きると考えられているが，高  $I_c R_n$  積が得られる再現性が向上する<sup>5)</sup>．

図 3・4 には，この種のジョセフソン接合の低温での代表的な電流-電圧特性と  $I_c R_n$  積の温度依存性を示す． $I_c R_n$  積は，高温超伝導 SFQ デバイスの動作温度である 40 K で 1 mV を超える．また，超伝導材料を  $T_c$  の高い SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> などに替えた接合では，77 K で 0.1 mV を超える  $I_c R_n$  積が得られ，SQUID にも利用されている．

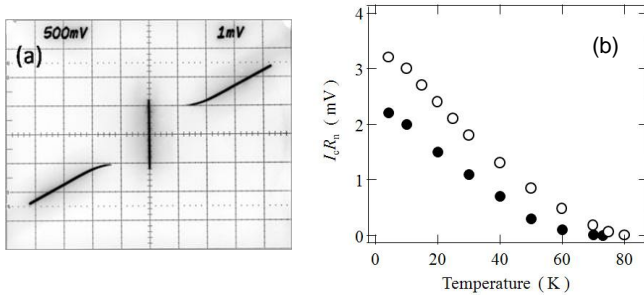


図 3・4 界面改質型ランプエッジ接合の (a) 代表的な電流-電圧特性と (b)  $I_c R_n$  積の温度依存性 (黒丸、白丸は図 3・3 の (a)、(b) に対応)

### 3-1-3 集積化技術

SFQ デバイスの作製には，超伝導グランドプレーンを含む超伝導層が 3 層以上の薄膜積層構造とジョセフソン接合の集積化が必要となる．図 3・5 には，SFQ 要素回路やサンプラー回路などの機能回路の試作のために開発された界面改質型ランプエッジ接合を含む薄膜積層構造の断面模式図及び断面 SEM 写真を示す<sup>5)</sup>．接合の  $J_c$  のばらつきを抑制するためには，薄膜積層構造の表面粗さを低減することが必要であり，このため，一部 La 置換した YBCO など組成ずれによる析出物が出にくい薄膜材料が用いられている<sup>6)</sup>．

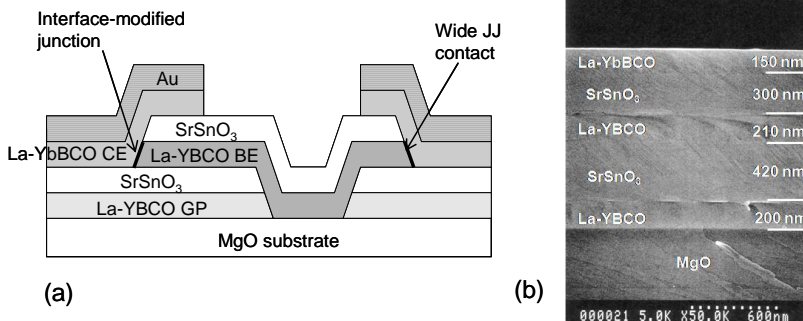


図 3・5 ランプエッジ型接合を含む集積回路用薄膜積層構造の (a) 断面模式図と (b) 断面 SEM 写真

また、絶縁層には、 $\text{SrSnO}_3$  などのペロブスカイト酸化物や  $\text{CeO}_2$  など YBCO 系材料との積層に適した材料が用いられている。YBCO は構造上 c 軸配向しやすい性質をもっているため、絶縁層材料には厳密な格子整合性は必要なく、むしろアウトグロース粒などの異常成長が起こりにくい材料が望ましい。

図 3・5(b) に示した材料の組合せでは、最表面の平均粗さ  $R_a$  で 1~2 nm の値が実現されている。このような薄膜積層構造の作製プロセスでは、下部の超伝導層からの酸素抜けが必ず起きるため、プロセス終了後に酸素中アニール処理により酸素を導入することが必要である。この際、絶縁層を含む c 軸方向からの酸素拡散速度が非常に遅いため、基板に達する穴開けを数百  $\mu\text{m}$  間隔で行い、薄膜端から a, b 軸方向に酸素拡散を行う方法が有効である。

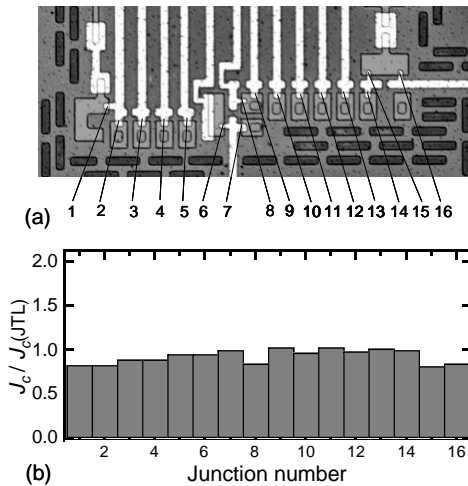


図 3・6 ほぼ同面積のベース電極パターンを用いたレイアウトによるトグルフリップフロップ回路中におけるジョセフソン接合の  $J_c$  の分布 (標準偏差は約 8%)

集積回路中の界面改質型接合の  $J_c$  は下部超伝導電極のパターンサイズにも依存することが分かっており、図 3・6 に示した SFQ トグルフリップフロップ回路の場合、ほぼ同じサイズの下部電極を用いたレイアウトの採用により、接合  $J_c$  の標準偏差を 8% 程度に抑えることができて<sup>7)</sup>。また、このような薄膜積層構造は集積型 SQUID の作製にも利用されている。

■参考文献

- 1) R. H. Hammond and R. Bormann, Physica C, vol.162-164, p.703, 1989.
- 2) P. Berberich et al., Physica C, vol.219, p.497, 1994.
- 3) H. Hilgenkamp, J. Mannhart, Rev. Mod. Phys., vol.74, p.485, 2002.
- 4) B. H. Moeckly, K. Char, Appl. Phys. Lett., vol.71, p.2526, 1997.
- 5) K. Tanabe et al., IEICE Trans. Electron., vol.E91-C, p.280, 2008.
- 6) S. Adachi et al., IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, p.206, 2004.
- 7) H. Wakana et al., Jpn. J. Appl. Phys., vol.45, p.L105, 2006.

## ■9 群 - 2 編 - 3 章

### 3-2 酸化物系 SQUID とその応用

(執筆者：糸崎秀夫) [2009 年 4 月受領]

#### 3-2-1 酸化物系 SQUID の特徴と構造

金属系超伝導体は、素子動作に液体ヘリウムを必要とするため、一般的に、脳磁場計測にみられるように大規模なシステムを必要とする。したがって、液体窒素温度で動作できる酸化物系高温超伝導体が発見されて以降、SQUID 応用の発展は急速に展開した。同時に、酸化物系材料ゆえの課題も浮き彫りになった。金属系とは異なり、コヒーレント長に異方性があり、超伝導薄膜は、エピタキシャル成長が必要である。結晶性により、超伝導特性は大きく影響を受け、複雑な構造の素子作製には制限がある。

そこで、酸化物系 SQUID として、まず単層膜で作製できる代表的な構造について、dc-SQUID を例にとり説明する。単層膜により作製できる構造は、作製工程がよりシンプルであるため酸化物系に適している。高感度化のためには、3-2-2 節で述べる様々な工夫が行われるが、これらの技術においても、単層膜で作製できる構造が基礎となっている。

簡単な SQUID 構造は、ワッシャータイプと呼ばれる超伝導薄膜による磁束集中板方式である。超伝導薄膜の完全反磁性の性質を応用し、通常、角型の超伝導板を用い、計測すべき磁束を SQUID ループに集中する方式である。SQUID ループの配置による超伝導板に入るスリットの影響を考慮して、数種の形状が検討された。スリットの影響も考慮し、大面積ワッシャーの試みも報告されている<sup>1)</sup>。

ワッシャータイプでは、有効面積の拡大に限界があるため、磁界は検出コイルにより検出し、これにより生じる電流を直接 SQUID に結合する方式が、ダイレクトカップリングタイプである。検出コイルを更に大型化する場合、3-2-2 節で述べる磁束トランス結合が有効である。

ダイレクトカップリング方式の検出コイルを二つ対称に用意し、これを SQUID に直結した構造を平面グラジオメータと呼ぶ。この方式では、磁場の空間微分を計測することになるが、空間的に均一な環境磁場を除去することが可能であるため、環境磁場中における微弱磁界の検出に有効である。図 3・7 に、実装された、STO バイクリスタル基板上に作製した YBCO 薄膜平面グラジオメータの光学顕微鏡像を示す<sup>2)</sup>。

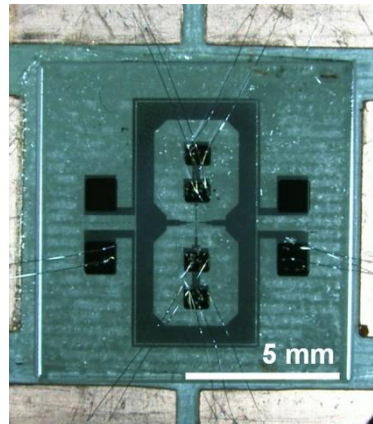


図 3・7 STO バイクリスタル上に作製した YBCO 薄膜平面グラジオメータ

#### 3-2-2 酸化物系 SQUID 技術

高感度化には、有効磁場捕獲断面積を増やす必要があるが、3-2-1 節で述べたダイレクトカップリング型の検出コイルを更に大型化するために、SQUID とは別途、大型の検出コイルを作製し、これを磁束トランスにより結合する方式が開発された<sup>3)</sup>。有効面積を更に上げるた



めには、入力コイルのマルチターン化が行われる。また、マルチループ方式と呼ばれる方式がある。これは、SQUID ループを大きくすることにより検出感度を上げる方式であるが、ループを並列に接続した構造にし、インダクタンスを低く抑えるように設計される。報告例では、酸化物系は金属系に比べループの個数が倍程度必要となる<sup>4)</sup>。これらの方式は積層構造が必要であり、作製は単層膜に比べより複雑となる。

酸化物系高温超伝導は金属系に比べ、冷却が容易であり、システムのポータブル化が可能である。屋外での利用などを踏まえ、磁気シールドレス化が積極的に検討された。3-2-1 節で述べた平面グラジオメータでは、ベースラインを十分とることができないので、複数のマグネットメータを空間的に配置し、その出力を電氣的に差引く、電氣的グラジオメータ技術が開発された<sup>5)</sup>。更にアクティブノイズコントロール (ANC) の技術が検討され<sup>6)</sup>、環境磁場低減の努力がハード・ソフトの両面から進められている。

高温超伝導 SQUID システムの商品化例の最初のもは、アメリカにおいて、1992 年に Conductus 社から発売された「Mr. SQUID」である。現在は、STAR Cryoelectronics 社がそれらのライセンスを引継ぎ、各種 SQUID システムの販売を行っている。我が国においては、日本で最初の高温超伝導体 SQUID の製品が、住友電気工業において開発され、1996 年に「高温超伝導 SQUID キット」として発売された。この装置は非常にコンパクトでかつ高性能に設計されており、これまで大掛かりであった SQUID 計測実験を身近なものにした。このキットを用いた SQUID 計測実験の様子を図 3・8 に示す (信号モニタ用にレコーダ、オシロスコープが接続されている)。このキットは、大学、国研、民間企業で多数使用され、酸化物系 SQUID 応用研究に拍車がかかった。そして、3-2-3 節で述べる各種応用製品開発に発展していった。また、ドイツにおいては、ユーリッヒ (Jülich) 国立研究所のグループが、酸化物系高温超伝導体による rf-SQUID の開発を大きく進展させ<sup>7)</sup>、商品化に成功している。

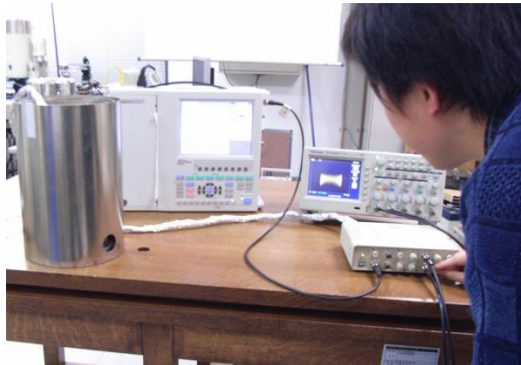


図 3・8 研究・教育現場で活躍する「高温超伝導 SQUID キット」

### 3-2-3 酸化物系 SQUID の応用

酸化物系 SQUID を用いた応用は、現在もますます発展しているが、ここではその代表的な応用例をもとに進展の状況を概観する。

**生体計測 (心磁計) :** マルチチャンネル心磁計の研究が進展している。液体窒素冷却で動作



可能な酸化物系 SQUID は、比較的小さな病院においても普及が期待できる。1996 年に 32 チャンネル心磁計測システムが住友電気工業により開発され、リアルタイムに 32 箇所的心磁を計測することを可能にした<sup>8)</sup>。ラジオメータ<sup>9)</sup>、ANC 技術<sup>10)</sup>を用いた磁気シールドドレス化も進められている。日立製作所は可搬型でコンパクトな心磁計を開発し、縦型シールド方式の 16 チャンネル心磁計<sup>11)</sup>、ドーム型シールド方式の 51 チャンネル心磁計測システムを開発している。

**非破壊検査：**ドイツのユーリッヒグループにおいて、ヨーク磁石励起による磁束漏洩法を用いた道路橋のプリレストコンクリートの検査や渦流探傷法による航空機の亀裂などの検査が SQUID を用いて精力的に行われた<sup>12)</sup>。SQUID には感度の周波数依存性がないため、低周波の信号を用い深部の欠陥検出が可能である。検査の対象材料は、アルミニウムから CFRP (炭素繊維強化プラスチック) に及んでいる。また、鉄など、大きな磁化をもつ材料に対しては、補償磁場によりノイズをキャンセリングさせて計測を可能にしている<sup>13)</sup>。

**SQUID 顕微鏡：**磁界検出コイルの大きさ、試料と SQUID の距離を小さくすることが、空間分解能を高める上で重要となる。この点を高めるため、高透磁率の針をフラックスガイドとした走査型 SQUID プローブ顕微鏡が開発された<sup>14)</sup>。更に最近、プローブ先端と試料表面の間にトンネル電流を流すことにより、ナノスケールで磁気イメージングが可能な STM-SQUID 磁気顕微鏡が開発された<sup>15)</sup>。

**半導体検査：**半導体にバンドギャップに見合う波長のレーザーを照射し、それにより誘起された電流がつくる磁場を SQUID 顕微鏡により評価するものである<sup>16)</sup>。試料に対してレーザーを走査する場合、分解能はレーザーの集光径近くまで上げることができる。得られる磁場分布から、ウェーハの不純物分布や、多結晶膜の結晶粒界<sup>17)</sup>を完全非接触により評価することができる。図 3・9 にレーザー-SQUID プローブ顕微鏡装置の外観を示す。この技術は LSI チップの故障解析にも応用が検討されている<sup>18)</sup>。



図 3・9 レーザー-SQUID プローブ顕微鏡

**地質調査：**地表にむけて、磁界を送信し、送信切断後に地下で誘起される誘導電流がつくる誘導磁界を計測することにより、金属鉱床探査が行われている。CSIRO 国立研究所 (オーストラリア) のグループによってオーストラリアでの鉱物資源探査が行われ、地表のみなら

ず、航空機を用いた空中からの SQUID 計測が実施された<sup>19)</sup>、ドイツ、日本においても地質調査用機器の開発が進められている。

**金属物混入（食品）検査：**工業材料への不純物混入検査は、品質管理の上から重要な課題である。1997 年、ワイヤ中の直径  $50 \mu\text{m}$  磁化微粒子が、 $800 \text{ m/min}$  の高速スクロールにおいて、SQUID により検出可能であった<sup>20)</sup>。この応用は、近年、食品用異物検査装置にも適用された。検査対象物を磁石で磁化し、その残留磁化を SQUID で計測するため、アルミニウムなどの包装材の影響をほとんど受けず、食品に含まれる水分や環境温度の影響も受けることなく検査が可能である<sup>21)</sup>。

**免疫検査（バイオ診断）：**ナノメータオーダの磁気微粒子を SQUID 測定用マーカとして用い、抗体を標識する。抗原は高分子ビーズなどに固定し、この抗原に、磁気微粒子で標識した抗体を結合させる。マーカからの磁気信号を SQUID で検出することにより、免疫検査の高感度計測が可能である<sup>22)</sup>。従来の光学マーカ（蛍光酵素など）に比べ、30 倍以上の高感度を得ており、磁界検出法の改良・最適化が精力的に行われている。

以上のように、酸化物系 SQUID は、液体窒素冷却により簡便に利用できるため、多様な応用研究が進展している。

#### ■参考文献

- 1) S. Tanaka, H. Itozaki, and T. Nagaishi, "Properties of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  Large Washer SQUID," Jpn. J. Appl. Phys., vol.32, no.5A, pp.L662-L664, May 1993.
- 2) X. Y. Kong, Y. Nakatani, A. Yutani, T. Maki, and H. Itozaki, "First-order High Tc SQUID Gradiometer," Physica C, vol.468, pp.1946-1949, 2008.
- 3) D. Koelle, A. H. Miklich, E. Dantsker, F. Ludwig, D. T. Nemeth, and J. Clarke, "High performance dc SQUID magnetometers with single layer flux transformers," Appl. Phys. Lett., vol.63, no.26, pp.3630-3632, Dec. 1993.
- 4) F. Ludwig, E. Dantsker, R. Kleiner, D. Koelle, and J. Clarke, "Integrated high-Tc multiloop magnetometer," Appl. Phys. Lett., vol.66, no.11, pp.1418-1420, Mar. 1995.
- 5) D. F. He, H.-J. Krause, Y. Zhang, M. Bick, H. Soltner, N. Wolters, W. Wolf, and H. Bousack, "HTS SQUID Magnetometer with SQUID Vector Reference for Operation in Unshielded Environment," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.9, no.2, pp.3684-3687, Jun. 1999.
- 6) K. Sakuta, Y. Narita, and H. Itozaki, "Radio frequency interference noise reduction using a field programmable gate array for SQUID applications," Supercond. Sci. Technol., vol.20, pp.S389-S392, Oct. 2007.
- 7) Y. Zhang, W. Zander, J. Schubert, F. Rüdgers, H. Soltner, M. Banzet, N. Wolters, X. H. Zeng, and A. I. Braginski, "Operation of high-sensitivity radio frequency superconducting quantum interference device magnetometers with superconducting coplanar resonators at 77 K," Appl. Phys. Lett. vol.71, no.5, pp.704-706, Aug. 1997.
- 8) H. Itozaki, S. Tanaka, H. Toyoda, T. Hirano, Y. Haruta, M. Nomura, T. Saijou, and H. Kado, "A multi-channel high-Tc SQUID system and its application," Supercond. Sci. Technol., vol.9, pp.A38-A41, 1996.
- 9) U. Leder, F. Schrey, J. Haueisen, L. Dörner, J. Schreiber, M. Liehr, G. Schwarz, O. Solbrig, H. R. Figulla, and P. Seidel, "Reproducibility of HTS-SQUID magnetocardiography in an unshielded clinical environment," Int. J. Cardiol., vol.79, no.2-3, pp.237-243, Jul. 2001.
- 10) A. Mizukami, H. Nishiura, K. Sakuta, and T. Kobayashi, "High critical temperature superconducting quantum interference device magnetometer with feedforward active noise control system for magnetocardiographic measurement in unshielded circumstances," Physica C, vol.392-396, pp.1411-1415, Oct. 2003.
- 11) D. Suzuki, A. Tsukamoto, K. Yokosawa, A. Kandori, K. Ogata, and K. Tsukada, "A mobile and space-saving high-temperature superconducting multichannel magnetocardiograph in a vertical magnetically shielded cylinder," Jpn. J. Appl. Phys., vol.43, no.1, pp.117-120, Jan. 2004.
- 12) H.-J. Krause, M. v. Kreutzbruck, "Recent developments in SQUID NDE," Physica C, vol.368, pp.70-79,

2002.

- 13) K. Okita, M. Tsuduki, K. Sakuta, and H. Itozaki, "Remote NDE using high-Tc SQUID," *Physica C*, vol.463-465, pp.1052-1055, Oct. 2007.
- 14) H. Itozaki, T. Kondo, and T. Nagaishi, "HTS scanning SQUID microscope," *Physica C*, vol.392-396, pp.1392-1395, Oct. 2003.
- 15) T. Hayashi, M. Tachiki, and H. Itozaki, "STM-SQUID probe microscope," *Supercond. Sci. Technol.*, vol.20, no.11, pp.S374-S379, Oct. 2007.
- 16) J. Beyer, H. Matz, D. Drung, and Th. Schurig, "Magnetic detection of photogenerated currents in semiconductor wafers using superconducting quantum interference devices," *Appl. Phys. Lett.*, vol.74, no.19, pp.2863-2865, May 1999.
- 17) K. Kojima, S. Suda, X. Y. Kong, and H. Itozaki, "Non-destructive evaluation of semiconductor using laser SQUID microscope," *Physica C*, vol.445-448, pp.979-981, Oct. 2006.
- 18) K. Nikawa, "Laser-SQUID Microscopy as a Novel Tool for Inspection, Monitoring and Analysis of LSI-Chip-Defects: Nondestructive and Non-electrical-contact Technique," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E85-C, no.3, pp.746-751, Mar. 2002.
- 19) C. P. Foley, K. E. Leslie, R. Binks, C. Lewis, W. Murray, G. J. Sloggett, S. Lam, B. Sankrithyan, N. Savvides, A. Kataros, K.-H. Muller, E. E. Mitchell, J. Pollock, J. Lee, D. L. Dart, R. R. Barrow, M. Asten, A. Maddever, G. Panjkovic, M. Downey, C. Hoffman, and R. Turner, "Field Trials using HTS SQUID Magnetometers for Ground-based and Airborne Geophysical Applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.9, no.2, pp.3786-3792, Jun. 1999.
- 20) H. Itozaki, T. Nagaishi, H. Toyoda, H. Kugai, "Detection of Fine Iron Particles in High Speed Scrolled Wire by High-Tc SQUID," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E80-C, no.10, pp.1247-1251, Oct. 1997.
- 21) T. Nagaishi, F. Kamitani, H. Ota, K. Nishi, K. Kuwa, H. Fujita, and S. Tanaka, "First Practical High Tc SQUID System for the Detection of Magnetic Contaminants in Commercial Products," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.17, no.2, pp.800-803, Jun. 2007.
- 22) K. Enpuku, T. Tanaka, T. Matsuda, H. Kuma, N. Hamasaki, F. Dang, N. Enomoto, J. Hojo, K. Yoshinaga, F. Ludwig, F. Ghaffari, E. Heim, and M. Schilling, "Liquid Phase Immunoassay Using Magnetic Markers and Superconducting Quantum Interference Device," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.46, no.11, pp.7524-7529, Nov. 2007.

■9 群 - 2 編 - 3 章

3-3 超伝導マイクロ波デバイスとその応用

(執筆者：大嶋重利) [2009年3月受領]

高性能なマイクロ波デバイスを作製するためには、マイクロ波表面抵抗の小さい材料を用いる必要がある。超伝導体のマイクロ波表面抵抗は金属と比較し2〜3桁小さいので、その应用到に適した材料である。しかし、従来の金属系超伝導体は液体ヘリウム温度まで冷却させないとその性能を活かすことができず、マイクロ波デバイスへの応用は困難であった。酸化物超伝導体が発見されると、その冷却問題がほぼ解消され、優れた超伝導マイクロ波デバイスが世に出るようになった。この節では、まず、超伝導マイクロ波デバイスに重要な特性である表面インピーダンスについてその理論的な解釈について述べる。次に超伝導マイクロ波デバイスの代表的な例としてバンドパスフィルタとアンテナについて説明する。

3-3-1 超伝導体の表面インピーダンス

超伝導体に直流電流を流した場合には抵抗ゼロで電流が流れるが、高周波の電流を流したときには大きな抵抗(損失)が発生する。では、高周波(マイクロ波帯)の電流を流したときにどのくらい抵抗が発生するであろうか。超伝導体に流れる電流を超伝導電流  $J_s$  と常伝導電流  $J_n$  の2流体としてとらえ、マクスウェルの方程式とロンドンの方程式から、表面インピーダンスを求める式が導き出される<sup>1)</sup>。図3・10で示されるように、z方向から平面波(角周波数 $\omega$ の正弦波)を導体に照射した場合、導体内に伝搬する電界、磁界を求められれば、表面インピーダンスが決まる。式(1)〜(2)にマクスウェルの方程式を示す。ここで、 $\lambda$ 、 $\omega$ 、 $\mu_0$ 、 $\sigma_n$ はそれぞれ、ロンドンの侵入長、角周波数、真空の透磁率、導体の導電率である。

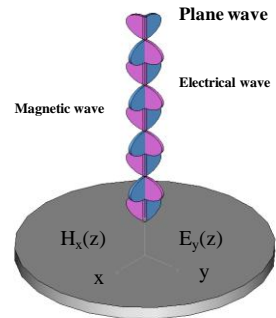


図3・10 導体への平面波照射モデル

$$\nabla \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_n + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad \frac{\partial \vec{J}_s}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0 \lambda^2} \vec{E}, \quad \vec{J}_n = \sigma_n \vec{E}, \quad (1)$$

$$\nabla \nabla \vec{H} = \frac{1}{j\omega \mu_0 \lambda^2} \nabla \vec{E} + \sigma_n \nabla \vec{E} + j\omega \varepsilon \nabla \vec{E} = -\frac{1}{\lambda^2} \vec{H} - j\omega \mu_0 \sigma_n \vec{H} + \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \vec{H} \quad (2)$$

マイクロ波帯の領域では  $\omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \gg 1/\lambda^2$  が成立するので、式(2)は次のように近似される。

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{\lambda^2} \vec{H} + j\omega \mu_0 \sigma_n \vec{H} \quad (3)$$

式(3)より、 $H_x(z)$ を求め、これを  $\nabla \vec{E} = -\mu_0 \partial \vec{H} / \partial t$  に代入すると、 $E_y(z)$ が求められる。

$$H_x(z) = H_0 \exp\left\{-\left(\frac{1}{\lambda^2} + j\omega \mu_0 \sigma_n\right)^{0.5} z\right\}, \quad E_y(z) = \frac{j\omega \mu_0 H_x(z)}{\left(\frac{1}{\lambda^2} + j\omega \mu_0 \sigma_n\right)^{0.5}} \quad (4)$$

導体の表面インピーダンス  $Z_s$  は、 $z=0$ における電界と磁界の比、 $Z_s = \frac{E_y(z)}{H_x(z)} \Big|_{z=0}$  で定義さ

れる。したがって、表面インピーダンスは次のように表される。

$$Z_s = \frac{j\omega\mu_0}{\left(\frac{1}{\lambda^2} + j\omega\mu_0\sigma_n\right)^{0.5}} = R_s + jX_s \quad (5)$$

導体が金属の場合は、 $\lambda$ を $\infty$ として考えればよい。金属、超伝導体の表面インピーダンスはそれぞれ次式となる。

$$\text{金属: } Z_{sm} = \frac{j\omega\mu_0}{(j\omega\mu_0\sigma_n)^{0.5}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma_n}} + j\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma_n}} \quad (6)$$

$$\text{超伝導体: } Z_{ss} = \frac{\omega\mu_0\lambda}{\sqrt{2}} \left[ \frac{\sqrt{1 + (\omega\mu_0\sigma_n\lambda^2)^2} - 1}{(\omega\mu_0\sigma_n\lambda^2)^2 + 1} \right]^{0.5} + j \frac{\omega\mu_0\lambda}{\sqrt{2}} \left[ \frac{\sqrt{1 + (\omega\mu_0\sigma_n\lambda^2)^2} + 1}{(\omega\mu_0\sigma_n\lambda^2)^2 + 1} \right]^{0.5} \quad (7)$$

$\omega\mu_0\sigma_n\lambda^2 \ll 1$  の場合には、式(7)は式(8)となる。この式が一般的に超伝導体の表面インピーダンスと呼ばれる式である。ここで、 $R_s$ を表面抵抗、 $X_s$ を表面リアクタンスと呼ぶ。

$$Z_{ss} = \frac{\omega^2\mu_0^2\sigma_n\lambda^3}{2} + j\omega\mu_0\lambda = R_s + jX_s \quad (8)$$

式(7)、式(8)は、十分厚い超伝導体にマイクロ波を照射したときの表面インピーダンスを表す式である。薄膜の場合には電磁波が基板まで到達するので、表面インピーダンスは基板の影響を受けて変化する<sup>2)</sup>。これを見かけ上の表面インピーダンス  $Z'_s$  とし、 $Z_s$  と  $Z'_s$  の関係を求めると式(9)になる。

$$Z'_s = Z_s \frac{Z_d + Z_s \tanh(\gamma_f t)}{Z_s + Z_d \tanh(\gamma_f t)} \quad (9)$$

ここで、 $Z_d$  は基板のインピーダンス、 $\gamma_f$  は薄膜の伝搬定数である。一般的に、 $Z_s \ll Z_d$  なので、式(9)は式(10)になる。

$$Z'_s = R'_s + jX'_s = R_s \coth\left(\frac{t}{\lambda}\right) + jX_s \coth\left(\frac{t}{\lambda}\right) \quad (10)$$

図3・11に、横軸をロンドン侵入長 $\lambda$ で規格化した膜厚( $t/\lambda$ )、縦軸を規格化した表面抵抗( $R'_s/R_s$ )のグラフを示す。この結果、薄膜の厚みが薄くなると、 $R'_s$ は急激に大きくなるのが分かる。基板の影響を受けないようにするには、膜厚を $2\lambda$ 以上にする必要がある。

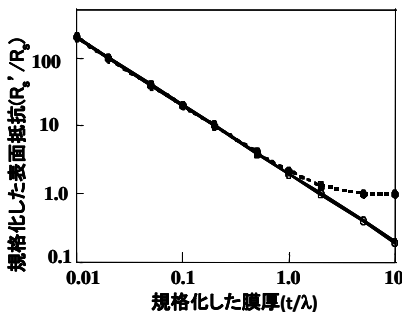


図3・11 膜厚と見かけ上の  $R'_s$  の関係

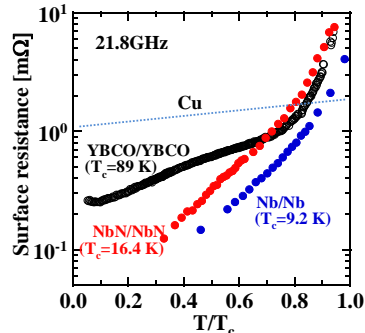


図3・12 Nb、NbN、YBCO 薄膜の  $R_s$  の温度特性

超伝導薄膜のマイクロ波表面抵抗を正確に測定する手法として、誘電体共振器法が提案されている<sup>3)</sup>。その方法で筆者らが測定した超伝導薄膜の表面抵抗の温度特性を図3-12に示す。Y横軸は、超伝導臨界温度  $T_c$  で規格化された温度である。YBCO 薄膜の  $R_s$  は NbN, Nb 薄膜  $R_s$  よりもやや大きい、銅と比較すると約一桁小さい。この測定は 21.8 GHz で行われた結果である。マイクロ波デバイスで使われる周波数帯 (~1 GHz) に換算すれば 77 K での YBCO 薄膜の  $R_s$  は、銅の 77 K の  $R_s$  と比較して、約 1000 分の 1 となることが分かる。Bi 系, Tl 系の超伝導薄膜の  $R_s$  も YBCO 薄膜とほとんど同じ特性である<sup>4)</sup>。

### 3-3-2 超伝導マイクロ波デバイス

#### (1) 超伝導フィルタ

超伝導フィルタは、低損失と極めて高い周波数選択性を持ち、ほぼ理想的なフィルタ特性を示す。この利点は、周波数が逼迫している無線通信の周波数有効利用向上や雑音除去に重要な素子として注目され、米国や中国の携帯電話の基地局用受信フィルタシステムとして実用化されている。また、日本でも気象用レーダの周波数有効利用・ノイズ低減フィルタとして実用化されようとしている。図3-13に超伝導フィルタの外観写真を示す。YBCO 薄膜で作製された7段共振器のチェビシェフ型フィルタである。このような超伝導フィルタの特性や応用分野を以下に述べる。

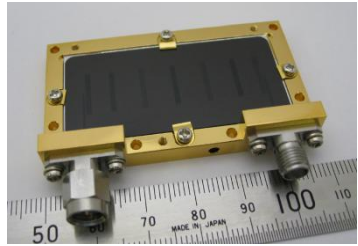


図3-13 超伝導フィルタの写真

#### (a) 携帯電話の基地局用受信システムへの応用

米国では携帯電話の周波数割り当てが複雑であり、従来のフィルタでは通話品質を向上させることができなかった。図3-14に、800 MHz 帯における周波数割り当ての状況を示す。A社とB社の周波数割り当てが複雑に入り組んでおり、混信解消が重要な問題となっていた。超伝導フィルタを用いると、図のフィルタ特性でも明らかなように、A, B社の信号を確実に区別することができる。その結果、通話品質が格段に向上し、超伝導フィルタシステムの需要が伸びた。現在米国では約7000基の基地局に超伝導フィルタシステムが使用されている<sup>5)</sup>。

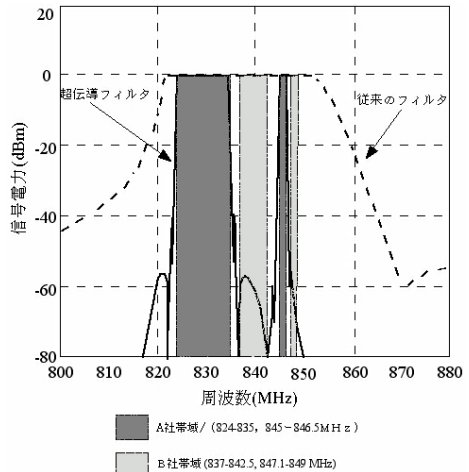


図3-14 米国の携帯電話周波数の割り当て状況

中国においても携帯電話の基地局用受信システムとして超伝導フィルタが実用化されている。図3-15に北京市内の携帯電話の基地局の写真、それに設置されているフィルタシステムの写真及び超伝導フィルタの特性を示す。超伝導フィルタ

システムを導入したことにより、基地局のカバーエリアが 30%以上広がったと報告されている<sup>6)</sup>。

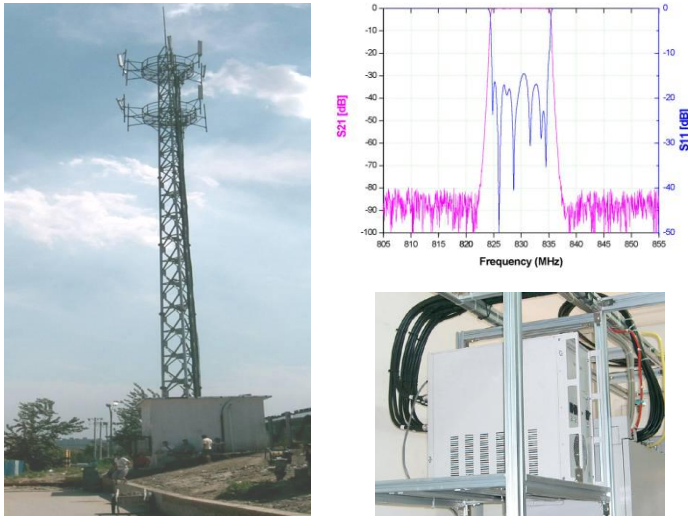


図 3・15 北京市内の携帯電話の基地局、フィルタ特性、フィルタシステム

(b) 気象レーダ用フィルタ

日本では 5 GHz 帯無線 LAN の利用者が急増している。そのために、現在使用されている 5 GHz 帯の無線 LAN の周波数帯域を広げ、気象用レーダシステムの帯域を狭くする必要が出てきた。その概念図を図 3・16 に示す。気象レーダの周波数帯域を狭くして活用するためには、狭帯域のバンドパスフィルタを開発しなければならない。しかし従来のフィルタではその実現が難しい。超伝導フィルタだけがこれを満足できる特性をもっている<sup>7)</sup>。

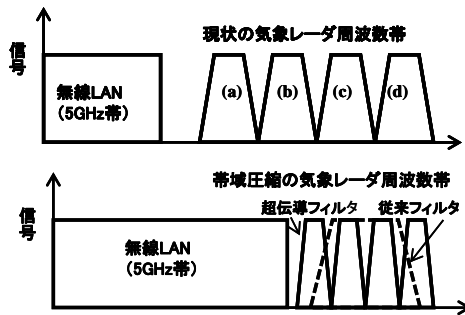


図 3・16 無線 LAN 周辺の周波数状

(2) 超伝導アンテナ

アンテナは、電氣的に小型にすると、放射インピーダンスが小さくなり相対的に導体損が



大きくなり効率が低下する。しかし、導体損の小さい超伝導体でアンテナを作製すればアンテナ効率の低下を防ぎかつ指向性の鋭いアンテナが実現できる。超伝導アンテナを実用化するためには、適切な冷却法を考えなければならない。そのためには、小型冷凍機を用いた熱伝導冷却方式を採用する必要がある。したがって、アンテナの種類は制約される。パッチアンテナとスロットアンテナは、それに適したアンテナである。図 3・17 に、我々が試作したパッチアレーアンテナの外観写真を示す<sup>8)</sup>。2 インチ丸の YBCO 薄膜に 16 素子のパッチアンテナを配置してある。共振周波数は 5 GHz である。銅で作製したアンテナよりも利得は向上しているが、理論的予測より小さい。衛星通信用のより周波数の高いアンテナアレーの報告もあるが、パッチアンテナ間のクロストークが大きく、利得も予想より小さい。

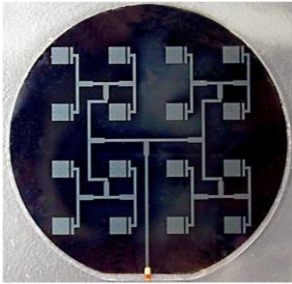


図 3・17 超伝導パッチアレーアンテナの外観写真



図 3・18 超伝導アンテナ用小型冷凍器の外観写真

超伝導フィルタを冷却するための小型冷凍機も開発されている。図 3・18 にその写真を示す。小型のスターリング型冷凍機を用いて、超伝導アンテナを 60 K 以下に冷却することが可能である<sup>9)</sup>。

### 3-3-3 まとめ

超伝導マイクロ波デバイスは、現在幾つかの分野で実用化が始まっている。特に、携帯電話の基地局の受信フィルタシステムでは、その有効性が立証されマーケットも拡大しつつある。しかし、それ以外のデバイスでは、ほとんどまだ研究段階である。これから超伝導マイクロ波デバイスは確実に実用化されるものと思われるが、それをより促進するためには、ほかのデバイスとの複合、ハイブリッドデバイスの検討が重要である。

#### ■参考文献

- 1) M. J. Lancaster, "Passive Microwave Device Applications of High-Temperature Superconductors," Cambridge University Press, London, 1997.
- 2) M. Hein, "High-Temperature-Superconductor Thin Films at Microwave Frequency," Springer, Berlin, 1999.
- 3) 国際標準規格: IEC61788-7 Ed.2; Superconductivity-Part 7: "Electronic Characteristic measurements-Surface resistance of superconductors at microwave frequencies," 2006.
- 4) J. R. Schrieffer and J. S. Books, "Handbook of High-Temperature Superconductivity," Springer, New York, 2006.
- 5) 大嶋重利, "超伝導フィルタの原理," 応用物理 基礎講座, vol.47, no.2, pp.210-213, 2003.
- 6) B. Wei, X. Guo, Y. Piao, S. Jin, X.P. Zhang, L. Gao, H. Peng, Z. Yin, and BS Cao, "Field test of HTS receivers on CDMA demonstration cluster in China," Chinese Science Bulletin, vol.54, no.2, pp.612-615, 2009.

- 7) 塩川教次, 加屋野博幸, 河口民雄, 渡辺貴俊, 橋本龍典, “気象レーダー用超電導フィルタの開発,” 信学技報, SC12008-14, MW2008-14, pp.75-80, 2008.
- 8) A. Cassinese, I. Fragala, M. Kusunoki, G. Malandrino, T. Nakagawa, L. M. S. Perdicaro, K. Sato, S. Ohshima, and R. Vaglio, *Physica C*, vol.372-376, pp.500-5003, 2002.
- 9) K. Ehata, K. Sato, M. Kusunoki, M. Mukaida, S. Ohshima, Y. Suzuki, and K. Kaneko, “Miniaturized Cooling System for HTS Antenna,” *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol.11, no.1, pp.111-114, 2001.

## ■9 群 - 2 編 - 3 章

### 3-4 超伝導テラヘルツ応用

(執筆者：斗内政吉) [2009年9月受領]

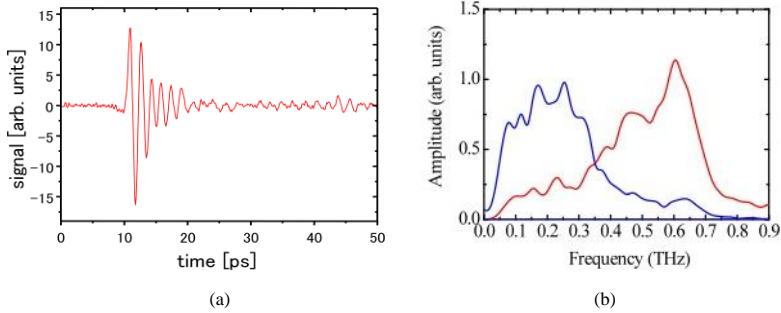
テラヘルツ電磁波の利用は将来の重要技術として、注目を浴びている<sup>1), 2)</sup>。テラヘルツ波は、周波数では約 100 GHz から 30 THz 程度の領域をさし、これまでも、未開拓電磁波領域として、基礎科学において長年、研究開発が進められてきた。1980 年代中盤から、様々なブレークスルーがもたらされ、新しいテラヘルツ科学技術分野として誕生してきている。テラヘルツ技術とは、テラヘルツ波、テラヘルツフォトニクス、テラヘルツエレクトロニクスを包括する、幅広い技術をさし、様々な研究開発分野を結ぶ横糸として位置付けることができる。それら三分野の融合により、生命・医療・健康・工業・宇宙・環境・安全/安心・情報通信・基礎科学など、広範な領域において、新規科学技術・応用分野を切り拓き、大きな波及効果をもたらすことが期待される。そのような中、超伝導エレクトロニクスは、長年、電波天文などのテラヘルツ技術を提供して生きており、重要な役割を担う。

テラヘルツ分野を支える基盤には、①光源開発、②検出器開発、ならびに③応用システム開発がある。テラヘルツ光源は、光テラヘルツ波変換、テラヘルツ量子カスケードレーザー、テラヘルツ発振素子など様々なアプローチにより、テラヘルツギャップと呼ばれる、未開拓領域への挑戦が続いている。そのような中、金属系では超伝導テラヘルツ発信器として、磁束量子フローを用いたサブテラヘルツ発信器 (FFO) が、研究開発されている。FFO の主な用途は、電波天文や宇宙環境計測など SIS 検出器用局部発信器 (外部への放射は想定していない) として利用されるもので、500~700 GHz 近傍の発信器として、TELIS (Terahertz and submm Limb Sounder) などへの応用が進められている<sup>3)</sup>。

酸化物系超伝導体を用いたテラヘルツ帯光源開発も取り組まれている。まず、超伝導電流をフェムト秒光パルス照射により光変調することで、3 THz 程度までのブロードバンド電磁パルスの放射が確認されており、放射パワーも比較的強い<sup>4)</sup>。

高温超伝導体自身が内在的に有する構造体を利用したイントリンシック接合による、テラヘルツ光源の開発も精力的に進められている。これは、立木らが提唱したもので、テラヘルツ放射光源としての利用を目的としている<sup>5)</sup>。Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 単結晶をメサ状に加工し、磁場下で電流駆動することで、内在するジョセフソン接合中の磁束量子運動を制御することで、発振を実現するものである。この放射を、先の光励起により実現した例を、**図 3-19** に示す<sup>6)</sup>。Tl<sub>2</sub>Ba<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> を用いて、光スイッチを作成し、フェムト秒レーザー励起テラヘルツ放射を観測したもので、磁場を印加していない場合は、約 100 GHz でピークをもつブロードバンド放射を示しているが、磁場 (100 Oe) を引加することで、共鳴現象が観測され知得る。共鳴周波数は、ジョセフソンプラズマ周波数である 640 GHz とほぼ一致している。

テラヘルツ検出器としては、2-3 節で解説されているように、金属系超伝導ミキサが、ミリ波からテラヘルツ波領域に至る超高感度電磁波検出システムとしてその地位を確立し、研究開発ならびに実用化が進められている。酸化物系では、高温超伝導ジョセフソン接合 (HTS-JJ) による、テラヘルツ検出器の開発あるが、雑音が大きく、金属系には性能は及ばない。そのような中、テラヘルツセンシング応用を目指した、広帯域検出器の開発が進められている。現在、フェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ分析・イメージングシステムの開



青は、非磁場印加時、赤は磁場印加時。

図 3・19 フェムト秒レーザー励起による  $Tl_2Ba_2CaCu_2O_{8-x}$  光スイッチからのテラヘルツ電磁波放射波形(a)と周波数スペクトル(b)。

発が進められているが、検出法として、低温成長 GaAs 光スイッチ、あるいは、非線形光学効果などが用いられている。超伝導体は、従来の手法に比べて高感度化が期待され、テラヘルツ検出器としての開発が進められている。

テラヘルツ応用分野を含めて、超伝導エレクトロニクスとオプトエレクトロニクス分野の融合による“超伝導フォトニクス”分野の開拓は、様々な展開が期待される新しい研究分野である<sup>7)</sup>。特に酸化物系では、光との親和性良く、様々な応用が期待される。

その例として、フェムト秒レーザーにより、高温超伝導体薄膜中で、磁束量子の生成・制御が可能であることが見出され、光デバイスの萌芽へと展開されている。基本的な原理は、極短光パルスによる対粒子を高速で破壊し、超伝導電流の変調することで、磁場の環境を瞬時に変化させるもので、光信号を磁気信号に変換させることができる<sup>8)</sup>。この機能を利用し、ジョセフソン磁束量子フロートランジスタ (JVFT) を用いて、光の演算や電気信号との演算を高速で実現することができると考えている。

図 3・20 に、試作したデバイス写真を示す。3  $\mu\text{m}$  × 5 本のジョセフソンブリッジとコントロールラインで構成され、今回は総てのジョセフソンブリッジに光パルスが照射されるように

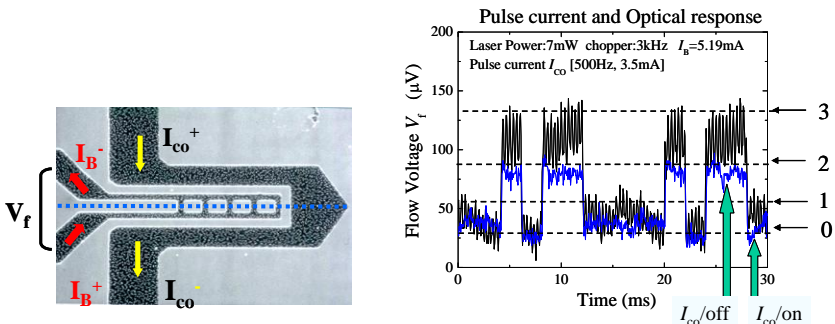


図 3・20 JVFT の例

0: 未入力, 1: 光のみ, 2: 電気信号のみ, 3: 電気信号と光同時入

図 3・21 動作例

した。フェムト秒光パルスが、ジョセフソンブリッジに照射されると、瞬時に臨界電流が変動され、コントロールラインからの供給磁場による磁束量子の侵入を制御できる。例えば、二つのフェムト秒光パルスが同時に入射したときだけ信号が発生するような、AND 光演算デバイスとして利用できる。

図 3・21 に、コントロール信号とフェムト秒光パルス列の応答を示す。電気信号のみによる JVFT の動作に加えて、フェムト秒レーザー信号との AND が実現されている。現状では大きなブリッジを用いているが、応答速度は、ほぼブリッジを横切る時間で制限され、縮小化により、サブテラヘルツ動作の光スイッチとして期待される。このような、光スイッチ・演算素子は、超伝導フォトニクスのキーコンポーネントデバイスと位置づけることができ、次節の、光インタフェースの最有力候補でもある。また、各ブリッジに異なる光制御が可能で、複雑な光演算や光・超伝導キュービットなどへの展開も期待される。

その他、超伝導フォトニクスとしては、2-3 節で解説されているように、金属系超伝導単一光子検出器 (SSPD) の研究開発が重要であるが、酸化物系では、SSPD の研究開発はまだ、盛んではなく、今後取り組まれていく分野となるであろう。

#### ■参考文献

- 1) 斗内政吉, “テラヘルツ技術,” オーム社, May, 2006.
- 2) M. Tonouchi, Nature Photonics, vol.1, pp.97-105, 2007.
- 3) V. P. Koshelets et al., “Superconducting Integrated Submillimeter Receiver for TELIS,” IEEE Trans. Appl. Supercond, vol.17, pp.336-342, 2007.
- 4) M. Tonouchi et al., “Enhanced THz radiation from YBCO thin film bow-tie antennas with hyper-hemispherical MgO lens,” IEEE Trans. Appl. Supercond, vol.7, p.2913, 1997.
- 5) M. Tachiki, S. Fukuya, and T. Koyama, “Mechanism of Terahertz Electromagnetic Wave Emission from Intrinsic Josephson Junctions,” Phys. Rev. Lett., vol.102, p.127002, 2009.
- 6) Y. Tomonari et al., “Resonant terahertz radiation from  $Tl_2Ba_2CaCu_2O_{8-\delta}$  thin films by ultrafast optical pulse excitation,” Appl. Phys. Lett., vol.80, p.3147, 2002.
- 7) 斗内政吉, “超伝導フォトニクス,” 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス第 146 委員会, 第 80 回研究会, 2006 年 11 月 2 日, 名古屋大学.
- 8) I. Kawayama et al., “Study on sub-THz signal input for superconducting electronic devices,” IEICE Trans. Electron., vol.E90C, p.588, 2007.