2014 年 2 月 3 日発行

超電導 Web2.1

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

超電導センサ（その 1）

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
副所長　田辺圭一

1. はじめに

超電導現象を利用したエレクトロニクスデバイスは、フィルタ等のアナログ受動デバイス、情報処理用のディジタルデバイス、センサ類の 3 つに大別することができるが、この中で最も多様なデバイスが開発されかつ実用化が進んでいるのがセンサ類である。超電導センサでは、超高感度を特長とする SQUID（超電導量子干渉素子）磁気センサや電波天文分野でのキーデバイスである SIS（Superconductor-Insulator-Superconductor）型のトンネル接合を用いたミクサ（mixer）が有名であるが、特に電磁波センサは SIS ミクサ以外にも多くのデバイスが開発され利用されている。

本特集では 6 回にわたり、主要な超電導センサの原理とその応用、また最近の技術進展について紹介する。この第 1 回では、総論として、超電導センサの種類と特徴、応用分野などをまとめる。主要なセンサについての詳細は第 2 回以降に紹介する。

2. 超電導センサの種類と特徴

2.1. 電磁波センサ

表 1 には、超電導を利用した種々の電磁波センサの主要要素、利用波長域、主な用途と特徴をまとめる。センサの構成要素に注目すると、2 つの超電導薄膜の間に 1-2 nm 程度の厚さの絶縁体バリア層を挟んだ SIS トンネル接合を利用するものと超電導薄膜を用いるものの 2 種に大別することができる。

表 1. 超電導電磁波センサの種類と特徴、用途

電磁波センサの種類	主要な要素	主な利用波長域	特徴	主な用途
SISミクサ	SISトンネル接合	ミリ波、サブミリ波（100−800 GHz）	高感度（量子限界）	天体、宇宙観測 地球大気観測
ホットエレクトロンボロメータ（HEB）	薄膜マイクロブリッジ	サブミリ波、テラヘルツ波（0.8 − 1.5 THz）	高感度	天体、宇宙観測
マイクロ波カイネティックインダクタンス検出器（MKID）	薄膜共振器	マイクロ波、ミリ波（50−300 GHz）	高感度、アレイ化容易	天体、宇宙観測
転移端センサ（TES）	吸収体、薄膜温度計	X線、ガンマ線、テラヘルツ波	高エネルギ分解能、高感度	元素分析（EDX）、核物質検査、宇宙観測
超電導トンネル接合検出器（STJ）	SISトンネル接合	X線	高エネルギ分解能、高速	各種分析（XAFS、高分子質量分析等）
超電導ナノワイヤ単一光子検出器（SNSPD）	薄膜ナノワイヤ	赤外線（1.55 μm）	高量子効率、低暗係数率	量子情報通信

© ISTEC 2014 All rights reserved.

超電導状態では電子がクーパー対を形成し、図 1 のエネルギ状態図に模式的に示すように、超電導ギャップの下の最低エネルギ状態に落ち込んでいる。超電導ギャップの大きさは超電導材料によって異なり、センサを含む超電導電子デバイスで広く用いられている臨界温度（T_c）が 9.2 K のニオブでは 4.2 K で約 1.5 meV の値である。このエネルギギャップの 2 倍以上のエネルギをもつ電磁波（ニオブの場合、周波数で約 720 GHz 以上、波長で約 4.2 mm 以下）を超電導体に照射すると、クーパー対が壊れ、ばらばらの電子（準粒子）がエネルギギャップの上に励起される。これにより、超電導薄膜の電磁気的特性や SIS トンネル接合の特性が大きく変化する。例えば、超電導薄膜の細線はその形状で決まる磁気インダクタンスに加え、超電導電子の速度が急には変われない慣性をもつことから発生する力学（カイネティック）インダクタンスをもつ。力学インダクタンスは、超電導クーパー対密度に反比例するため、準粒子励起によりその値が変化する。したがって、超電導薄膜で作った共振器の共振周波数が変化する。この原理を用いたのが、マイクロ波カイネティックインダクタンス検出器（Microwave Kinetic Inductance Detector: MKID）である。このセンサは、エネルギギャップの小さなアルミ薄膜等を用いることにより、50 GHz 程度のマイクロ波領域でも使用することができる。一方、準粒子励起は、図 2 に示すように、SIS トンネル接合のギャップ電圧以下でのトンネル電流の増大をもたらす。これを利用するのが超電導トンネル接合検出器（STJ）で、X 線照射に対し 1 光子で多数の準粒子が励起されるため、ギャップエネルギが 1 eV レベルと大きい半導体を利用した検出器に比べ高いエネルギ分解能が得られる。

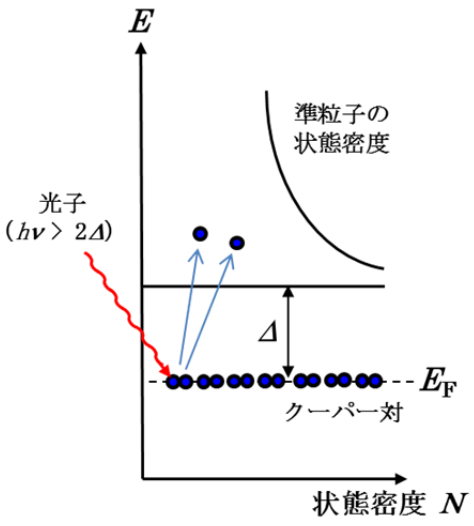


図 1.　超電導体のエネルギ状態図

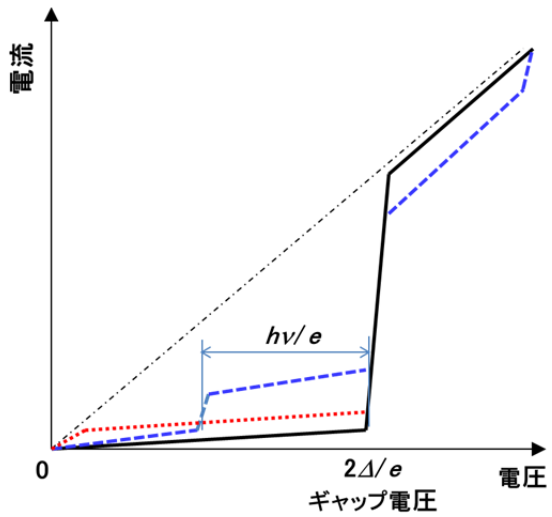


図 2. SIS トンネル接合の電流－電圧特性、赤波線は電磁波（$h\nu > 2\Delta$）照射による変化、青破線は光誘起トンネリング

電磁波照射により励起された準粒子はピコ秒という短時間の間に再結合しフォノン（格子振動）を放出する。放出されたフォノンは一部クーパー対を破壊しながら、最終的にはナノ秒の時間スケールで熱として基板に逃げていく。図 3 に模式的に示すように、超電導体の極薄膜（厚さ 5 nm 程度）で作製した幅 100 nm レベルのミアンダ形状のナノワイヤにその臨界電流に近いバイアス電流を流しておくと、光子吸収により発生した熱が局所的に超電導を壊し電圧が発生する。これを利用するのが、超電導ナノワイヤ単一光子検出器（Superconducting Nanowire Single Photon Detector:

© ISTEC 2014 All rights reserved.

SNSPD）で、文字通り光子 1 個の検出に用いられる。SNSPD は、アバランシェフォトダーオードなどの半導体検出器に比べ格段に暗係数率（雑音）が小さいという特長がある。一方、電磁波を超電導体ではなく常電導金属等に吸収させ、発生した熱による微小な温度上昇を超電導薄膜の T_c での急峻な電気抵抗の変化を利用して捉えるセンサが転移端センサ（Transition-Edge Sensor: TES）である。感度を上げるために急峻な転移を示す低温合金系超電導薄膜が用いられる。動作温度は 0.1 K 程度と低いが、非常に高い感度と X 線等に対しては STJ に比べても高いエネルギ分解能が得られる。

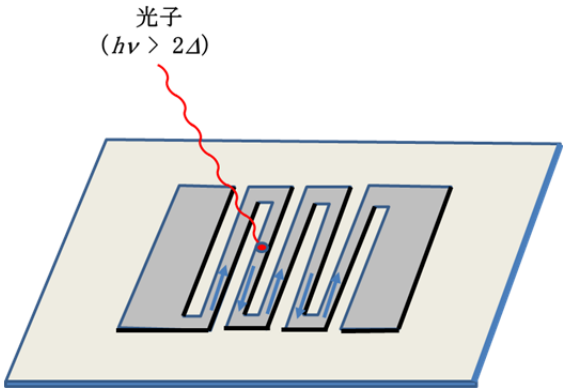


図 3.　SNSPD の動作原理
光子吸収により発生したホットスポットが広がり局所的に超電導が壊れる

SIS ミクサでは、上記の電磁波センサと全く異なり、トンネル接合に加えた局所発信器の信号と観測する電磁波との周波数ミキシングを行い、その差周波信号を検出するヘテロダイン検波を行っている。図 2 に示すように、SIS トンネル接合にギャップエネルギ以下の電磁波を照射すると、光子のエネルギをもらって準粒子がトンネル（Photon-assisted tunneling）できるため特性が大きく変化するが、これが周波数混合に利用される。SIS ミクサで観測できる電磁波の周波数の上限はギャップエネルギで制限される。一方、超電導薄膜の微小マイクロブリッジにギャップエネルギを超える電磁波を照射すると、エネルギの高い準粒子（ホットエレクトロン）が励起し電流―電圧特性が変化するが、これを利用してヘテロダイン検波を行うのがホットエレクトロンボロメータ（Hot Electron Bolometer: HEB）で、SIS ミクサでは検出できない THz 帯の電磁波センサとして開発が行われている。

超電導電磁波センサの用途としては、超高感度性能が必要となる天体・宇宙観測が最も多い。実際に SIS ミクサでは量子限界（$h\nu/k_B$）に近い極めて低い雑音温度が実現されており、他のセンサの追随を許さない。最近では、ALMA という国際プロジェクトにより、チリの標高 5000 m の高地において、複数の周波数帯の SIS ミクサを搭載した電波望遠鏡アレイによる観測が開始されている。一方、接合を用いない KMID や TES は大規模なアレイ化ができ、広範囲を短時間で観測できる利点がある。また、TES や STJ は高エネルギ分解能の X 線センサとして、元素や結晶構造の分析装置に、さらに高分子質量分析装置にも応用されている。SNSPD は量子鍵分配による暗号化通信など量子情報通信分野に主として応用されている。いずれも極限性能を要求する分野であるため、低温超電導体による極低温動作が基本となっている。SIS トンネル接合や極薄膜の作製が困難な酸化物高温超電導体については、現状では弱結合型ジョセフソン接合における交流ジョセフソン効果を利用した THz 波検出器等の開発が一部行われているのみである。

2.2. 超電導磁気センサ

超電導磁気センサのほとんどは SQUID を利用したものである。SQUID の基本要素は図 4(a)に示すようなジョセフソン接合を含む超電導ループである。特に直流 SQUID では、ループは 2 個のジョセフソン接合（ヒステリシスをもたない弱結合型の接合）を含む並列回路になっている。磁場ゼロの状態では、並列回路に電流を流すと左右均等に超電導電流が流れるが、ループに磁場が鎖交すると左右のジョセフソン接合の位相差が変化することで電流バランスが崩れ、ループには実効的な周回電流が発生する。この周回電流の作る磁束と外部磁場の作る磁束の和は磁束量子Φ_0 （$=h/2e = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb）の整数倍に量子化されている（磁束量子化、正確にはフラクソイドの量子化と呼

© ISTEC 2014 All rights reserved.

ばれる)。すなわち、外部磁束に対しフラクソイド量子化を保つように接合の位相差が変化するわけである。左右の接合に流れる超電導電流のバランスが崩れた状態では、並列回路の超電導電流の和は減少し、その電流－電圧特性は図 4(b)のように周期的に変化する。ループに鎖交する磁束が磁束量子の整数倍、半整数倍の時に超電導電流の和はそれぞれ最大、最小になる。したがって、並列回路の最大臨界電流の値に近いバイアス電流を流しておくと、図 4(c)に示すような鎖交磁束に対しΦ_0の周期で変化する電圧変化（数 10-100 μV 程度）が得られる。磁気センサとして用いる場合には、測定対象に合わせた大きさの磁場検出コイルをこの並列ループに磁気的にあるいは直接結合して用いる。また、図 5 に示すようなフィードバック回路（増幅器、積分器、並列ループに逆向きの磁場を印加するコイルからなる）を用い、外部磁場による変化を打ち消すようにフィードバックをかけることで、外部磁場に比例した出力電圧が取り出せると共に、より微小な磁場変化を検出できるようになる。図 4(c)での動作点を固定することになるので、この回路は Flux-Locked Loop (FLL) 回路と呼ばれる。

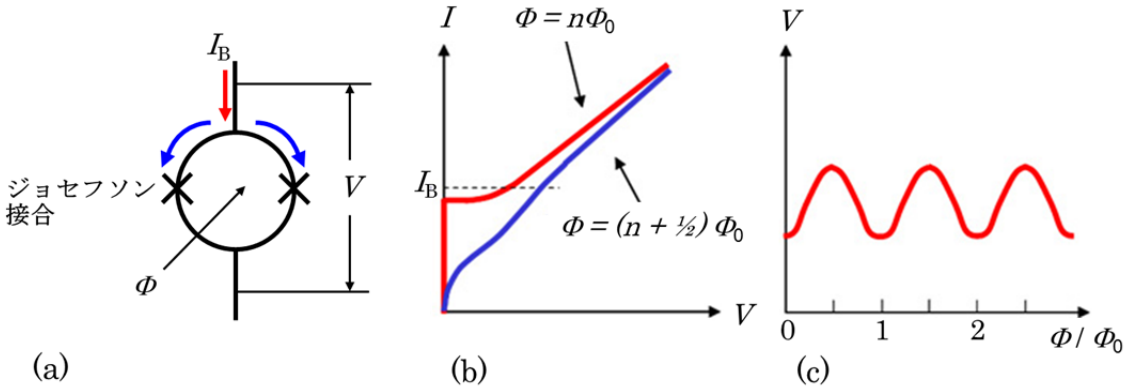


図 4.　(a)直流 SQUID の基本要素、(b)電流－電圧特性、(c) 電圧－磁束特性

SQUID を利用した磁気センサの感度（磁場ノイズ）は、検出コイルサイズにも依存するが、ニオブ系低温超電導ジョセフソン接合を用いた液体ヘリウム冷却、4.2 K 動作のセンサで 1-10 fT/Hz$^{1/2}$（fT：フェムトテスラ = 10^{-15} T）と、人の脳から発生する微弱な磁場を十分検出することが可能なため、脳磁計や超低磁場 MRI などの生体磁気計測を中心に用いられている。一方、銅酸化物高温超電導ジョセフソン接合を用いた 77 K 動作の SQUID 磁気センサは、動作温度が高いため磁場ノイズは 5 -100 fT/Hz$^{1/2}$ と低温超電導 SQUID センサに比べ高いが、液体窒素冷却で容易に使えるため、非破壊検査や金属資源探査などの野外使用に適している。図 6 には SQUID 磁気センサと他の磁気センサの感度（磁場ノイズ）を比較した。フラックスゲートセンサ、磁気インピーダンス（MI）センサ等のセンサに比べ桁違いに高感度である。光ポンピングセンサのように SQUID に匹敵する感度をもつ磁気センサの開発されてきているが、SQUID は高感度だけでなく広い周波数帯域にわたり感度が一定という他のセンサにない特長をもっている。

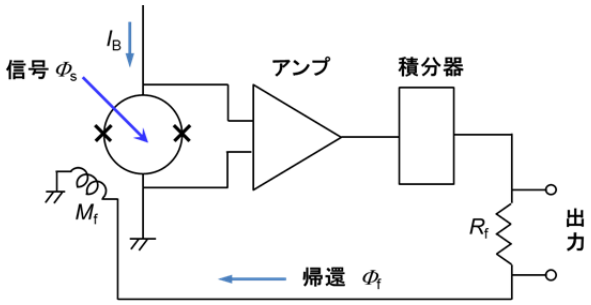


図 5. SQUID 磁気センサに用いられる FLL 回路の構成

© ISTEC 2014 All rights reserved.

SQUID の周期的な電圧変化量は 10-100 μV 程度であるが、より大きな電圧振幅や感度の向上をねらいとし、図 7 に示すようなサイズの異なるループをもつ SQUID を並列あるいは直列に接続した超電導量子干渉フィルタ（Superconducting Quantum Interference Filter: SQIF）というセンサも開発されている。ループサイズの異なる SQUID の特性重ね合わせにより、磁場ゼロを中心に大きな単一の電圧ピークが得られる（数 mV 程度の値まで報告されている）。磁気センサとしての実用化はまだのようであるが、増幅器等への応用も報告されている。

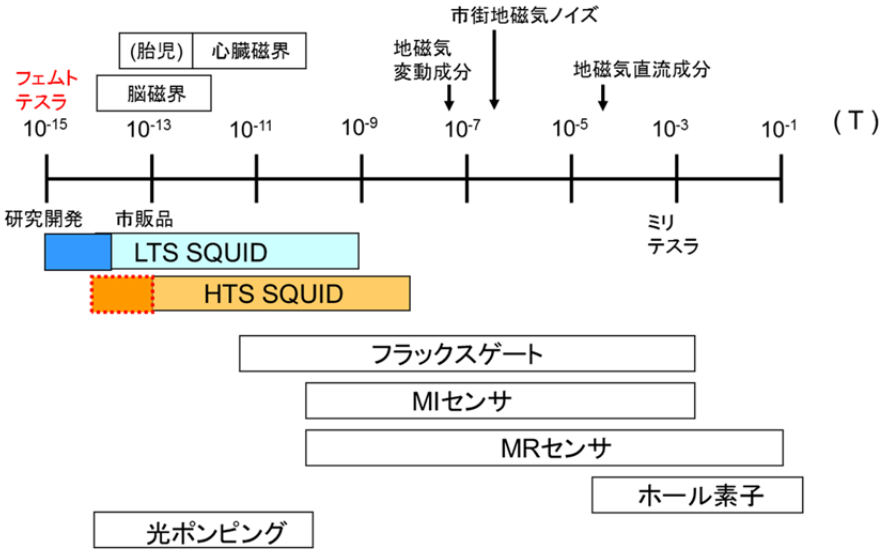


図 6. SQUID 磁気センサと他の磁気センサの感度（磁場ノイズ）の比較

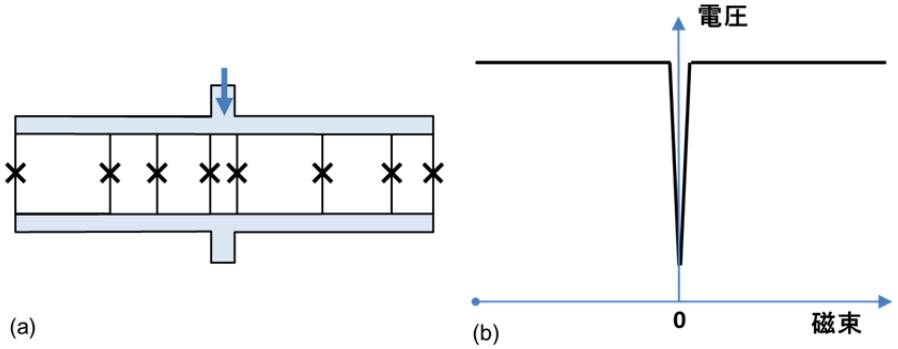


図 7.　SQIF の構成（並列 SQIF）と電圧－磁束特性

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2014 All rights reserved.

2014 年 4 月 1 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

超電導センサ（その 2）－ 高温超電導 SQUID 磁気センサとその応用

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
所長　田辺圭一

1. はじめに

本特集の第 1 回目では、超高感度を最大の特長とする種々の超電導電磁波センサと SQUID（超電導量子干渉素子）を中心とする超電導磁気センサについて、まず総論として、その原理と特徴、応用分野などをまとめた。第 2 回目では、液体窒素による簡易な冷却で使用できる銅酸化物高温超電導薄膜を用いた高温超電導 SQUID 磁気センサの構成と主な応用について紹介する。

2. 高温超電導 SQUID 磁気センサの構成

2.1. 基本構成

第 1 回目でも説明したように、SQUID 磁気センサの基本要素は、ジョセフソン接合（ヒステリシスをもたない弱結合型の接合）を 2 個含む超電導閉ループ（直流 SQUID の場合）であり、数 10 ミクロン程度の大きさと数 10 pH から 100 pH 程度のインダクタンス（L_{SQ}）をもつ。SQUID 磁気センサでは、ほとんどの場合、測定対象に応じたサイズや形状の磁場検出コイルをこの基本要素に結合させて用いる。高温超電導薄膜 1 層からなる高温超電導 SQUID 磁気センサでは、図 1(a) に示すように、検出コイルは SQUID ループに直接結合されている。この場合、検出コイルでの外部磁束密度 B_p に対し閉ループに伝達される磁束 Φ_s は、$\Phi_s = B_p A_p (L_{SQ}/L_p)$ となる。その伝達効率、$A_{eff} = \Phi_s/B_p = A_p (L_{SQ}/L_p)$ は面積の単位をもち、有効面積と呼ばれる。ここで、L_p、A_{ip} はそれぞれ検出コイルのインダクタンスと面積である。1 cm 程度のサイズの超電導薄膜からなる検出コイルのインダクタンスは 10 nH 程度と大きいので、伝達効率は悪く、有効面積は検出コイル面積の 1/100 程度以下となる。

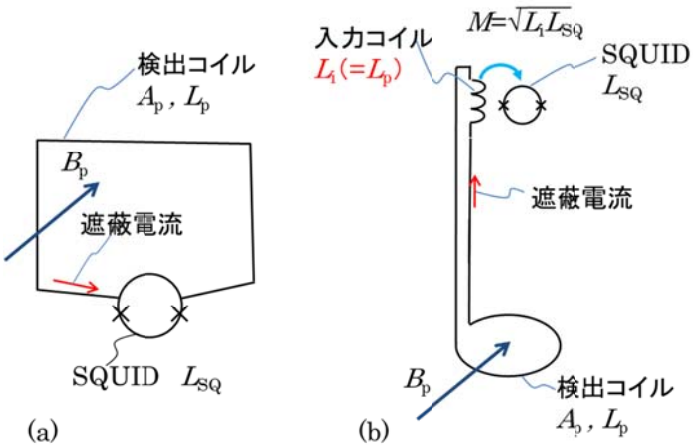


図 1.　(a)直接結合型、(b)磁気結合型のセンサ配置

© ISTEC 2014 All rights reserved.

一方、ほとんどの低温超電導 SQUID 磁気センサでは、図 1(b) に示すように、検出コイルはインダクタンス L_i の入力コイルを介して SQUID ループに磁気的に結合されている。入力コイルの巻数を多くして、$L_p \cong L_i$ とすることで伝達効率は最大になり、その場合、$A_{eff} \cong A_p (L_{SQ}/L_p)^{1/2}$ と、約 1 桁の改善が得られる。SQUID 磁気センサの磁場雑音（小さければ磁場感度が高いことを意味する）は、接合の特性やインダクタンスの設計で決まる SQUID 自体の磁束雑音を有効面積で割ったものであるので、有効面積の拡大は重要である。このようなトランス構造は、例えば、マルチターンの超電導薄膜入力コイルを絶縁層を介して SQUID ループに積層することで作られる。高温超電導薄膜を積層する技術は難しいが、後で示すように、ISTEC ではこのような積層構造をもつ高温超電導 SQUID を開発している。

SQUID 磁気センサは、磁化率測定装置など比較的強い磁場中で使用する場合は、検出コイルのみを磁場中に置き、SQUID 自体は磁気シールド中に配置する“分離型”の構成が採用される。低温超電導の場合は、Nb-Ti の超電導線と超電導スイッチを用いこの構成が実現できるが、高温超電導では超電導接続の技術が確立されていないため、接続部のみあるいは検出コイルを常電導線とした構成にならざるを得ない。この場合には、常電導抵抗 R_p の存在のため直流と低周波では感度が大きく低下するが、$f_{cutoff} = R_p/2\pi(L_p + L_i)$ で表される遮断周波数（典型的な値としては 100 Hz 前後）より上の周波数では一定の高い感度が得られる。

2.2. 薄膜積層型高温超電導 SQUID

高温超電導 SQUID のほとんどは、超電導薄膜 1 層のみを用いた直接結合型の SQUID であり、ジョセフソン接合としては、バイクリスタル接合や段差型接合といった粒界接合が利用されている。図 2 には、ISTEC で開発された薄膜積層型の高温超電導 SQUID の断面構造を模式的に示す。90 K 以上の T_c をもつ SmBCO など RE 系の高温超電導薄膜 2 層と複数の絶縁層から構成され、下層の超電導膜の斜面上に形成されるランプエッジ型のジョセフソン接合を採用している。接合の絶縁体バリアとしては、超電導相から組成のずれた極薄膜をまず堆積した後、続けて上部超電導薄膜を堆積することにより生じる界面付近の原子拡散と再結晶化を利用している。[1] この接合は、接合界面が上部超電導薄膜で覆われているため、粒界接合に比べ磁場印加での磁束トラップが生じにくいという特長がある。上部超電導薄膜は、接合だけでなく入力コイル等のセンサ要素の作製にも同時に使われる。

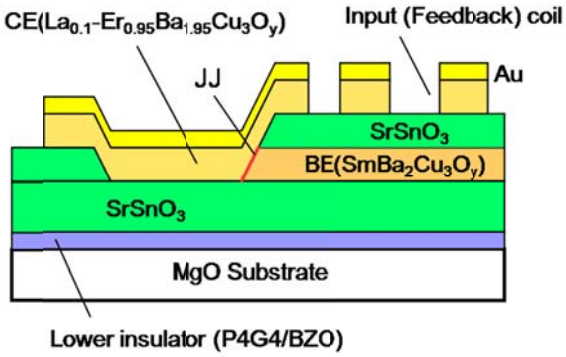


図 2. ISTEC で開発した高温超電導 SQUID 用の酸化物薄膜積層構造

図 3(a) には、薄膜積層技術を用いて 15 mm 角の MgO 基板上に作製された磁気センサの写真を示す。拡大写真のように、幅 2 μm、20 ターンの入力コイルが SQUID ループ（200 μm 角）に積層されたこのセンサは、1 kHz 程度以上の白色雑音領域で 10 fT/Hz$^{1/2}$ という市販の低温超電導 SQUID に迫る低い磁場雑音（高い磁場感度）を示す。一方、磁気シールドなしの地磁気中でセンサを用いる場合、冷却時に SQUID ループに磁束がトラップされ、低周波での磁場雑音が増大する。これを防ぐため、SQUID ループの線幅を 5 μm 程度と細くし、入力コイルをその周りに巻き付けたセンサも開発されている。[2] 図 3(b) には、磁場の勾配（空間変化）を検出する差分型センサ（グラジオメータ、上の検出コイル 1 つを用いたセンサはマグネトメータと呼ばれる）の代表例を示す。2 つの磁場検出コイルを”8 の字”型に配置し、2 つの検出コイルに鎖交する磁束の差分に比例した電流が

© ISTEC 2014 All rights reserved.

中心付近にある SQUID ループに流れ込むようになっている。地磁気など外来磁場の変動分が自動的にキャンセルされるので、磁気シールドを使用しない非破壊検査等への応用に適している。図 3(c) には、”分離型”の構成のために開発されたセンサを示す。SQUID チップ自体も外来雑音の影響を抑制するため差分型になっており、別基板上に作製したやはり差分型の 59 ターンの入力コイルチップを貼り合わせて用いる。入力コイルチップには、常電導線で作った検出コイルからの配線をハンダ接続して用いる形になっている。

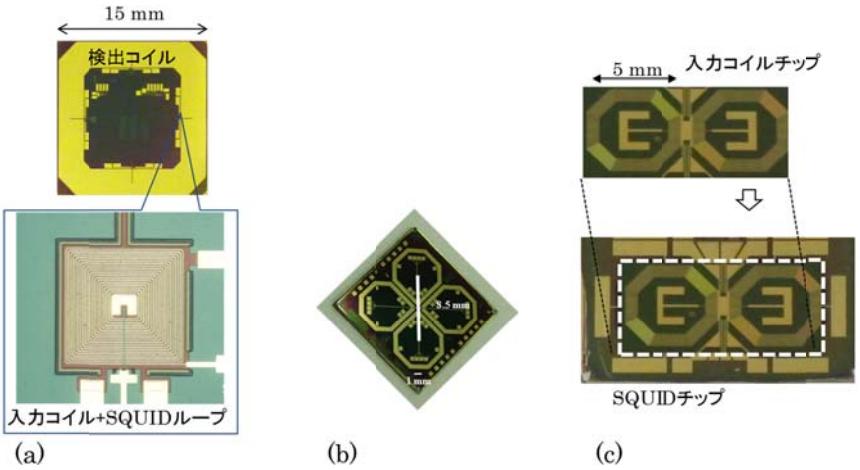


図 3. ISTEC で開発した各種の高温超電導 SQUID 磁気センサ

高温超電導 SQUID 磁気センサでは、冷却時に接合近くの薄膜にトラップされた磁束により低周波雑音が増大する現象が多く見られるため、ヒータ等でセンサ近傍の温度を一旦 T_c 以上に上げて再冷却する”トラップ抜き”が行われる。不均一な温度勾配がつかないように冷却すると、上記グラジオメータでは数 Hz 程度の低周波まで 3-10 $\mu\Phi_0/\mathrm{Hz}^{1/2}$ という低い磁束雑音が得られることがわかっている。これは、4.2 K 動作の Nb 系低温超電導 SQUID の約 5 倍程度で、動作温度の違いでほぼ説明できる値である。

3. 高温超電導 SQUID 磁気センサの応用例

これまでに、高温超電導 SQUID 磁気センサを応用した様々な装置が開発され、一部実用化されている。ここでは、磁場印加なしに自然に発生する磁場変化を計測するケースと、磁場を印加することにより誘起される微弱な磁場変化を計測するケースに分けて、その代表例を幾つか紹介する。前者の代表例としては、心臓や脳の活動によって発生する微弱な磁場変化を測定する生体磁気計測がまず挙げられる。脳磁計測の報告も最近あるが、[3] 高温超電導 SQUID 磁気センサの感度は脳磁計測にはぎりぎりのレベルである。より発生磁場の大きい心磁に関しては、実用化には至らなかったが、51 チャンネルの高温超電導 SQUID 磁気センサを用いた液体窒素冷却の MCG（Magneto-cardiogram）計測システムが以前試作されている。[4] 生体磁気計測システムには現状では地磁気を遮蔽する磁気シールドルームが必要であり、コスト低減の足かせになっている。一方、高温超電導 SQUID 磁気センサは地磁気変化の精密測定にも用いることができる。図 4(a) には、地震の原因となる断層破壊に伴う微弱な地磁気変化を測定するために、福島県いわき市に設置された計測システムの写真を示す。3 個の SQUID 磁気センサで地磁気の x,y,z 成分の時間変化を 1 pT の感度で連続測定（サンプリング時間間隔は 0.02 s）している。図 4(b) には、昨年 9 月に起こった計測システムから距離 15 km の地点を震源とする M5.8 の地震前後の観測データの例を示すが、地震波が到達する 3 秒前に 50 pT 程度の大きな地磁気変化が現れている。このような地磁気変化を計測

© ISTEC 2014 All rights reserved.

することで、地震の P 波を利用した現用システムより早い地震緊急速報を出すシステムが構築できるのではないかと期待されている。[5)]

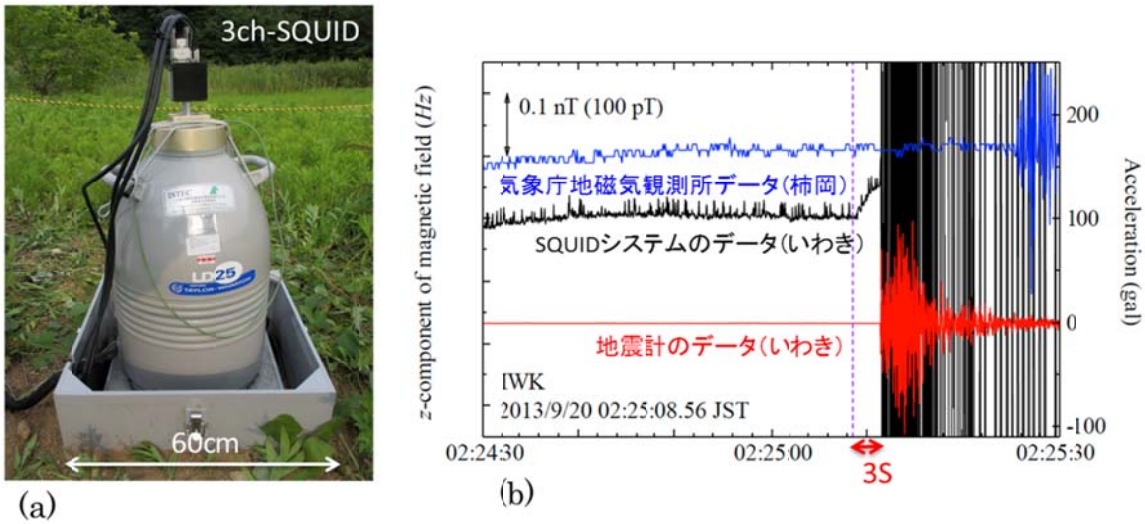


図 4. (a)高温超電導 SQUID 磁気センサを用いた地磁気計測システム、(b)いわき地方で起きた地震前後の SQUID 及び地震計データ（ISTEC、首都大学東京、東北大学、テラテクニカ、福島高専との共同研究）

後者の代表例としては、渦電流（誘導電流）を利用した非破壊検査や金属資源探査が挙げられる。図 5(a) には、過渡電磁応答（Transient Electro-Magnetic: TEM）法による金属資源探査の原理を示す。地表に 100-200 m 角に敷設したコイルにパルス電流を流すと、電流が Off になると同時に誘導電流が地下に誘起され地中深く伝わっていく。この誘導電流の減衰は地下の比抵抗に依存するため、コイルの中心に置いた高温超電導 SQUID 磁気センサで誘導電流の作り出す磁場の時間変化を計測することで、低比抵抗の金属鉱床の存在やその深度を検知することができる。図 5(b) には JOGMEC の委託で開発された実用機の写真を示す。左が、SQUID センサ冷却用の液体窒素容器と接続ケーブル、右が受信機である。この実用機は約 1000 m の深さの探査が可能で、[6)] 海外での探査に使用されている。

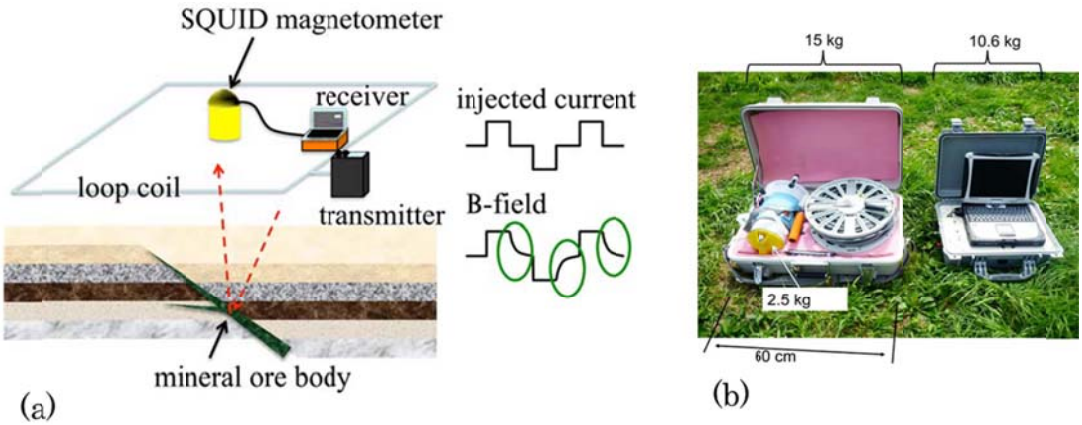


図 5. (a) TEM 法による金属資源探査の原理、(b) 高温超電導 SQUID を用いた金属資源探査装置実用機（JOGMEC 委託により ISTEC、三井金属資源開発が開発）

© ISTEC 2014 All rights reserved.

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

金属部材に交流磁場を印加し、部材中に誘起される渦電流分布の欠陥周りでの異常を微弱な磁場変化として検出する渦流探傷（Eddy Current Testing: ECT）法は、汎用的な非破壊検査法の一つであり、主として常電導コイルが磁気センサとして用いている。常電導コイルは高周波でのみ高い感度をもつのに対し、SQUID は渦電流が金属部材の深部にまで到達できる低周波でも高い感度を有するため、磁気センサとして用いた場合、配管裏面のき裂などの深部欠陥の検出が期待できる。一方、多くの実用金属部材は磁性材料で、大きな表面磁化をもっている。このような部材に SQUID を直接近づけると動作不能になるが、前節で述べたような常電導検出コイルを用いた"分離型"の構成を取ることで磁化した材料の検査が可能になる。[7)]

その他、磁場印加により誘起される微弱な磁場変化を計測する高温超電導 SQUID 磁気センサの応用としては、簡易型の磁化率計測装置、[8)] 磁気微粒子マーカを利用した免疫検査装置 [9)]やガン検査装置、超低磁場 NMR 検査装置 [10)] などの開発が進められている。また、一部実用化されている食品中の金属異物検査装置 [11)] や上記の免疫検査装置では、永久磁石を用い金属異物や磁気微粒子を磁化する方法が用いられている。

参考文献：

1) 田辺圭一, "ジョセフソン接合作製技術の進展", 電子情報通信学会誌, vol. 95, p. 736 (2012).
2) A. Tsukamoto, S. Adachi, Y. Oshikubo, and K. Tanabe, "Design and fabrication of directly-coupled HTS-SQUID magnetometer with a multi-turn input coil", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, p. 1600304 (2013).
3) M. I. Faley, U. Poppe, R. E. Dunin-Borkowski, M. Schiek, F. Boers, H. Chocholacs, J. Dammers, E. Eich, N. J. Shah, A. B. Ermakov, V. Y. Slobodchikov, Y. V. Maslennikov, and V. P. Koshelets, "High-T_c DC SQUIDs for Magnetoencephalography", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, p. 1600705 (2013).
4) 神鳥明彦,"心磁計開発の最先端",応用物理, vol. 74, p. 580 (2005).
5) 大久保　寛, 波頭経裕, 塚本　晃, 田辺圭一, 大西信人, 古川　克, 磯上慎二, 竹内伸直, "緊急地震超速報システムの実現に向けて", 検査技術, vol. 19, p. 1 (2014).
6) T. Hato, A. Tsukamoto, S. Adachi, Y. Oshikubo, H. Watanabe, H. Ishikawa, M. Sugisaki, E. Arai and K. Tanabe, "Development of HTS-SQUID magnetometer system with high slew rate for exploration of mineral resources", Supercond. Sci. Technol., vol. 26, p. 115003 (2013).
7) J. Kawano, A. Tsukamoto, S. Adachi, Y. Oshikubo, T. Hato, K. Tanabe, and T. Okamura, "Development of non-destructive evaluation system using an HTS-SQUID gradiometer for magnetized materials", Phys. Procedia, vol. 27, p. 336 (2012).
8) K. Sakai, M. M. Saari, T. Kiwa, A. Tsukamoto, S. Adachi, K. Tanabe, A. Kandori and K. Tsukada, "Development of a compact DC magnetometer using HTS-SQUID and a rotating sample", Supercond. Sci. Technol., vol. 25, p. 045005 (2012).
9) 円福敬二, "磁気ナノマーカーを用いたバイオ免疫検査法の開発",まぐね,vol. 2, p. 596 (2007).
10) H. -C. Yang, "High-Tc SQUID-detected nuclear magnetic resonance and imaging for assaying biomolecules and detecting tumors", 6th East Asia Symposium on Superconductive Electronics, 27-SA1-1, Yonezawa, Japan, Oct. 2011.
11) S. Tanaka, H. Fujita, Y. Hatsukade, T.Nagaishi, K. Nishi, H. Ota, T. Otani and S. Suzuki, "A food contaminant detection system based on high-Tc SQUIDs", Supercond. Sci. Technol., vol. 19, S280 (2006).

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2014 All rights reserved.

2014 年 6 月 2 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

超電導センサ（その 3）－ 超伝導ナノワイア単一光子検出器の開発現状と今後の展望

独立行政法人　情報通信研究機構
未来 ICT 研究所　ナノ ICT 研究室
研究マネージャー　寺井弘高

1. はじめに

超伝導ナノワイア光子検出器（SNSPD または SSPD、本稿では SSPD に名称を統一する）は、高検出効率、低暗計数率、高計数率、低ジッタ、広波長帯域という魅力的な特長を兼ね備えており、世界中で活発な研究開発が行われている。表 1 に各種光子検出器の性能をまとめた [1)-8)]。従来、1 μm 以下の光波長では光電子増倍管（PMT）や Si 単一光子アバランシェフォトダイオード（SPAD）が、通信波長帯（1550 nm）では InGaAs SPAD が広く用いられてきた。SSPD は深紫外から中赤外の光波長に対して高い検出感度を持ち、特に 1550 nm の性能で InGaAs SPAD に対して大きな優位性を持つことから、量子鍵配送をはじめとする量子情報分野への応用が期待されている。SSPD は計数率やジッタにおいて他の技術に比べて優位性があるものの、検出効率は同じ超伝導技術を使う転移端センサ（TES）に比べて大きく劣っていた。しかしながら、最近の研究の進展により 1550 nm で 93 %という検出効率も報告されており、TES と同等のレベルにまで達している。本稿では、SSPD の動作原理、研究開発の現状、今後の展望について紹介する。

表 1 各種光子検出器の性能

検出器	検出効率	暗計数率	最大計数率	ジッタ	動作温度	光子数識別	参考文献
PMT	40% @500 nm	100 Hz	10 MHz	300 ps	300 K	○	1
PMT	2% @1550 nm	200 kHz	10 MHz	300 ps	200 K	○	2
Si SPAD	65% @650 nm	25 Hz	10 MHz	400 ps	250 K	×	3
InGaAs SPAD	10% @1550 nm	91 Hz	10 kHz	370 ps	200 K	×	4
InGaAs SPAD	10% @1550 nm	16 kHz	100 MHz	55 ps	240 K	○	5
TES	95% @1550 nm	---	100 kHz	100 ns	0.1 K	○	6
SSPD	93% @1550 nm	~ 1 Hz	25 MHz	150 ps	< 2 K	×	7
SSPD	80% @1550 nm	40 Hz	30 MHz	68 ps	2.2 K	×	8

PMT: Photo-multiplier tube, SPAD: Single-photon avalanche photodiode, TES: Transition edge sensor, SSPD: Superconducting nanowire single-photon detector

2. 動作原理

SSPD の構造を図 1 に示す。厚さ 10 nm 以下の薄い超伝導薄膜を幅 100 nm 以下のナノワイアに加工し、メアンダ状に受光領域全体に敷き詰めた至ってシンプルな構造をしている。動作原理としてホットスポットモデルと呼ばれる仮説を紹介する [9)]。まず、ナノワイアに一定のバイアス電流を印可した状態で、光子がナノワイアに吸収されたとする（図 1 a）。光子のエネルギーによりナノワイアの一部の超伝導状態が局所的に破壊された領域（ホットスポット）が形成される（図 1 b）。バイアス電流はこのホットスポットを回避して流れるが、バイアス電流を超伝導状態が壊れるぎりぎりのところ（臨界電流値）まで印可しておくと、ホットスポットを回避した電流がナノワイアの臨界電流密度を超えて、ついにはナノワイアの断面全体にわたって超伝導状態が壊れる（図 1 c）。ナ

© ISTEC 2014 All rights reserved.

ノワイアが超伝導状態では素子両端の電圧はゼロであるが、図 1 c の状態ではホットスポット近傍に負荷抵抗よりも十分大きな抵抗が発生し、バイアス電流は負荷側（出力側）に流れる。バイアス電流が負荷側に流れることで、ホットスポットのエネルギーが緩和し、ナノワイアが初期状態に戻る。このような一連の動作により、ナノワイアが光子を吸収する毎に、スパイク状の電圧パルスが素子の両端に現れ、この電圧パルスを計測することで光子を検出することができる。

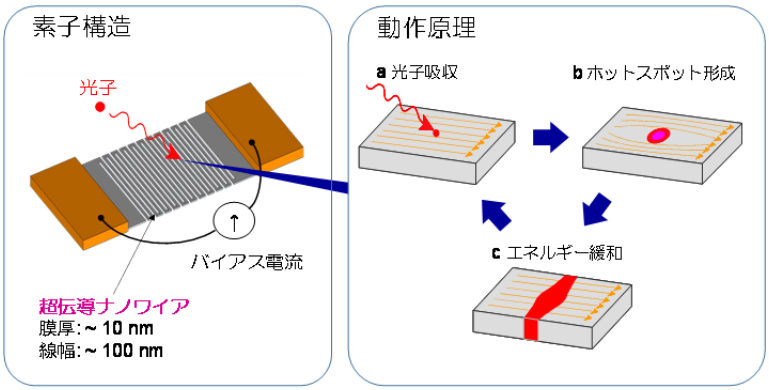


図 1　SSPD の素子構造と動作原理（ホットスポットモデル）

3. 研究開発の現状

情報通信研究機構（NICT）では 100 V 電源で駆動可能な 0.1 W の小型 GM（Gifford McMahon）冷凍機に 6 チャンネルの SSPD を実装したシステムを開発した（図 2）。この冷凍機は水冷が不要であるため、家庭用 100 V 電源があれば、いつでも、どこでも使用することができ、液体ヘリウム等の冷媒を供給することなく、長時間の連続運転が可能である。使いやすさへの配慮は、優れた性能にもかかわらず冷却が必要であるために敬遠されがちな超伝導エレクトロニクスにとって極めて重要である。SSPD の研究開発において、検出効率にここ数年で大きな改善が見られた。本稿では、SSPD の検出効率改善に向けた取り組みについて、少し詳しく解説したい。

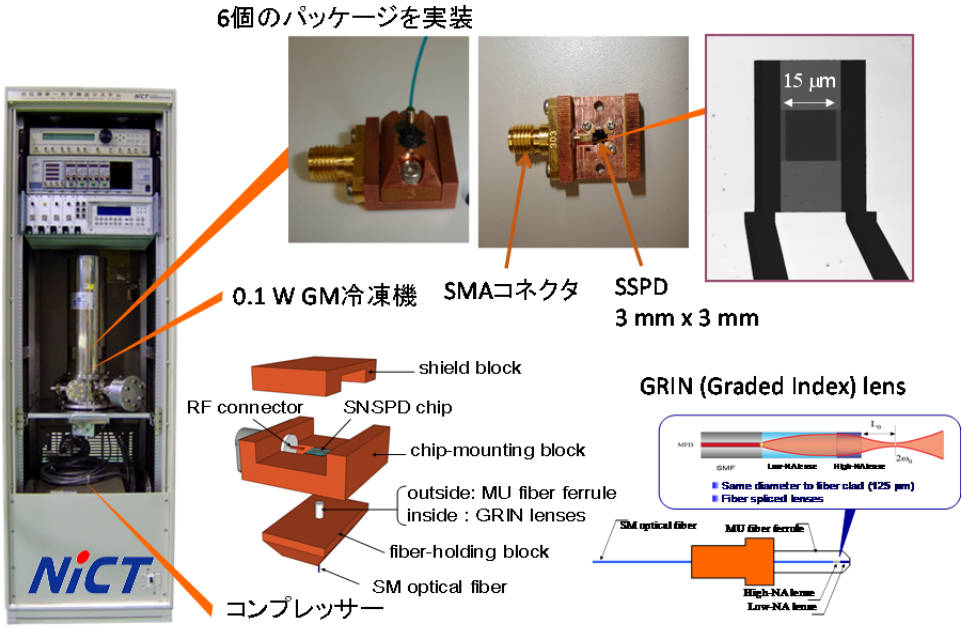


図 2　NICT で開発した 6 チャンネル SSPD システム

© ISTEC 2014 All rights reserved.

SSPD のシステム検出効率を決める要素として、①ファイバとの結合効率、②ナノワイアの光吸収効率、③パルス発生確率の 3 つがあり、これらを掛け合わせたものがシステム検出効率を与える。ファイバとの結合効率については、NICT ではファイバと SSPD 受光部との位置合わせをコンパクトに実現するための専用パッケージを開発した（図 2）。SSPD の受光面積を 15 μm x 15 μm とし、1550 nm 用シングルモード（SM）光ファイバの先端に融着した GRIN レンズによりビームを絞り込むことで、ほぼ 100 %のファイバ結合効率を達成している [10)]。

光子がすべて SSPD の受光面に入射したとして、それを検出するためにはナノワイアが光子を吸収しなければならない。当初、基板上に 5 nm 厚の超伝導薄膜を形成しナノワイアに加工しただけであったが、これでは光子が超伝導薄膜を透過してしまい高い効率で光子を吸収できない。そこで、透過した光子を再びナノワイアに戻すため、検出波長の 1/4 の厚さの誘電体を介して金属反射層を設ける（キャビティ構造）等の工夫が必要となる。現在、NICT では図 3 (a)に示すダブルサイドキャビティと呼ばれる構造を採用している [11)]。熱酸化膜（厚さλ/4）付きの Si 基板上にナノワイアを形成し、さらに厚さλ/4 の誘電体層を介して金属反射層を形成する。光子は基板の裏面から入射する。

ナノワイアの両側にある金属層と Si 層が光反射層として機能し、中央にある超伝導ナノワイアでの光電界が強められる。このようにナノワイアの両側に光反射層を設けることで、100 %近い光吸収効率を達成することが可能である。ここで興味深いのは、受光面積全体に占めるナノワイアの面積（フィリングファクタ）が 0.5 程度でも、光吸収効率として 100 %近い値が得られる点である。我々はナノワイアの線間距離が大きい場合（低フィリングファクタ）でも、90 %を超える光吸収効率を達成できることを、COMSOL と呼ばれる有限要素法を用いた市販のシミュレータによる計算で見いだした。この計算に基づき設計・作製した低フィリングファクタの SSPD において高い光吸収効率が得られることを実験的にも確認している [12)]。

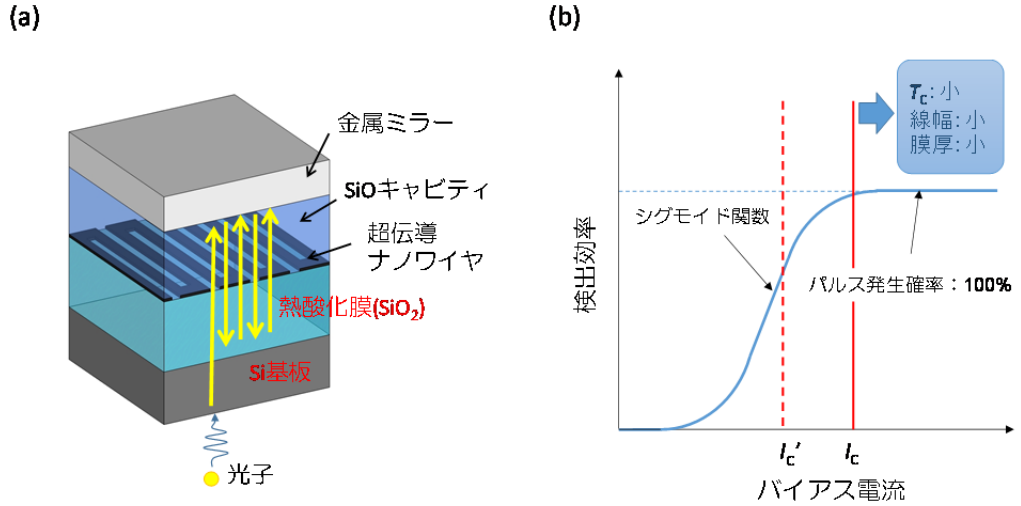


図 3　システム検出効率を決める 3 つの要素、(a) ダブルサイドキャビティ構造、(b) 検出効率のバイアス電流依存性とパルス発生確率

光子がナノワイアに吸収されたとして、最終的に電気信号として室温に取り出さなければ、光子を検出したことにはならない。SSPD の検出効率を決める最後の要素であるパルス発生確率は、光子の吸収によりナノワイアの超伝導状態が壊れ、電気信号が出力される確率であり、超伝導材料のエネルギーギャップ、ナノワイアの形状（膜厚・線幅）や特性の均一性により決まる。その様子を

© ISTEC 2014 All rights reserved.

図 3 (b)に示す。一般的に、検出効率のバイアス電流依存性はシグモイド関数で近似でき、検出効率が飽和した右側の領域において、パルス発生確率が 100 %となる。この図から明らかなように、臨界電流 I_C と呼ばれるナノワイアに印可できるバイアス電流の上限値がシグモイド関数の右側に位置するほど、高いパルス発生確率が得られる。そのためには、超伝導体のエネルギーギャップが小さい、もしくは膜厚が薄く、線幅が細い（容積が小さい）ほうが望ましい。しかしながら、もしナノワイアの特性に不均一があると、I_C は最も特性の悪い部分で制限されるため、I_C に到達する以前の I_C'までしかバイアス電流を印可することができない。これは、高いパルス発生確率を達成する上で明らかに不利となるため、できるだけ特性の均一なナノワイアを実現する必要がある [13)]。一方、超伝導体のエネルギーギャップが小さい、もしくはナノワイアの膜厚が薄く、線幅が細いと、I_C そのものの絶対値は小さくなる。I_C が小さいことは出力信号の SN 比が小さくなるため、読み出しのジッタが大きくなる。つまり、検出効率とジッタにはトレードオフが存在する。

米国国立標準技術研究所（NIST）では、ナノワイアに超伝導転位温度が 3.7 K 程度の WSi 採用し、I_C の半分以下のバイアス電流で、ほぼ 100 %のパルス発生確率、検出効率としても 93 %を達成している [7)]。しかしながら、I_C が 4 μA 弱と小さいため、ジッタが 150 ps 程度と大きい。図 4 に NICT で開発した SSPD の検出効率、暗計数率のバイアス電流依存性、および SSPD のジッタ測定結果を示す。NICT ではナノワイアに NbTiN を採用し、95 %以上のパルス発生確率、検出効率としても暗計数率 40 cps において 80 %を達成している。検出効率は NIST の SSPD に劣るものの、臨界温度が高い NbTiN を採用することで、ジッタとして 68 ps が得られている。

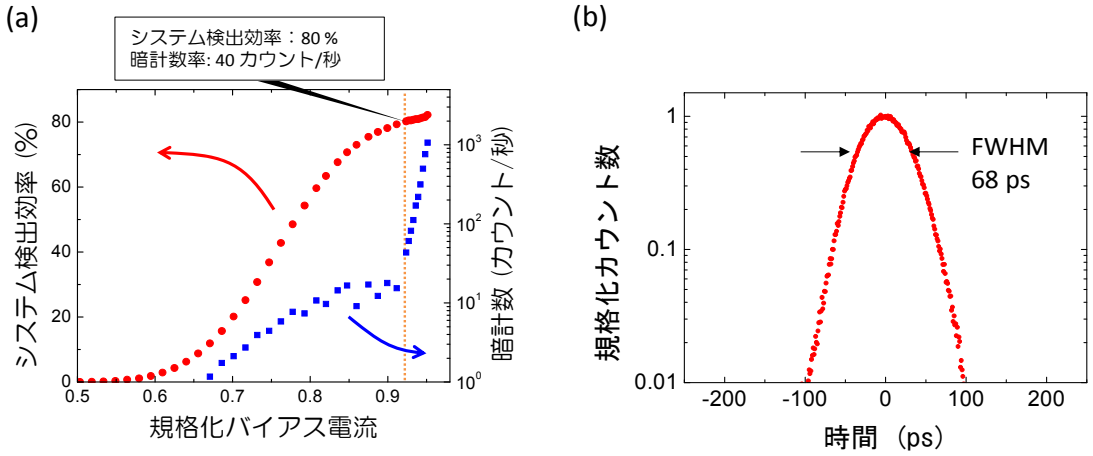


図 4　(a) システム検出効率、暗計数率のバイアス電流依存性、(b) SSPD の FWHM ジッタ

表 2　SSPD の性能比較

	NIST	MIT LL	NICT
検出効率 (λ=1550nm)	93%	>70%	80%
暗計数	1kHz(黒体輻射による)	1kHz(黒体輻射による)	40Hz
ジッタ	150ps	40-80ps	68ps
動作温度	300mK	2.5K	2.2K
冷凍機	断熱消磁	GM	GM
光結合方式	パッケージング	ナノポジショナ	パッケージング

© ISTEC 2014 All rights reserved.

表 2 に現在研究開発が最も進んでいると思われる米国 NIST、マサシューセッツ工科大学リンカーン研究所（MIT LL）、NICT の SSPD についてシステム性能をまとめた [7), 8), 14)]。それぞれ一長一短があり、どの SSPD が優れているとは一概に言えないが、小型冷凍機で動作する取り扱いの簡便さ、小型で信頼性の高い光結合方式、ジッタまで含めた総合的な性能を考えると、NICT で開発した SSPD は米国 NIST や MIT LL と比べても十分に優位性を持っていると言える。

4. 今後の展望

SSPD の検出効率についてはここ数年で大きく改善したが、それ以外にも性能改善の余地は多く残されている。ここでは、多ピクセル化と広波長帯域化に焦点を当て、今後の研究開発の展望について述べたい。

4.1 多ピクセル化

SSPD の特長の 1 つに高い計数率がある。競合する PMT（Photo multiplier tube）や SPAD（Single-photon avalanche photodiode）等では 100 MHz 程度の計数率が限界であるのに対して、SSPD では潜在的に 1 GHz を超える計数率が可能である。しかしながら、現状の SSPD では、ナノワイアのカイネティックインダクタンス L_K と負荷抵抗 R による L_K/R 時定数で不感時間が決まっており [15)]、15 μm x 15 μm の受光面積では 30 MHz 程度の最大計数率となっている。この L_K による最大計数率の限界を打ち破るためには、受光面を複数に分割する多ピクセル化が有効である [16)]。多ピクセル化により、ファイバ結合に十分な受光面積を確保しつつ、各々のピクセルを小型化できるため、さらなる高速動作が可能となる。また、単一の受光面では実現できなかった光子数識別も可能となる。

多ピクセル化における最大の課題は信号の読み出しである。読み出し用同軸ケーブルの本数が増大すると、冷凍機への熱負荷が増大し、小型 GM 冷凍機への実装が困難となる。読み出し用同軸ケーブルを削減するためには、冷凍機内部で信号を処理する必要がある。我々は単一磁束量子（SFQ）回路による極低温信号処理を世界に先駆けて提案し、原理実証を進めてきた [17)-19)]。図 5 に多ピクセル SSPD アレイと SFQ 信号処理のシステムイメージを示す。SFQ 回路は、100 GHz を上回るクロック周波数で動作可能、かつ 10,000 個のジョセフソン接合を含む回路でも数 mW の低消費電力で動作するため、極低温環境下での信号処理に適している。我々はこれまでに 4 ピクセル SSPD アレイと SFQ 信号処理回路を 0.1 W GM 冷凍機に実装し、クロストークフリー動作の実証に成功している [20)]。

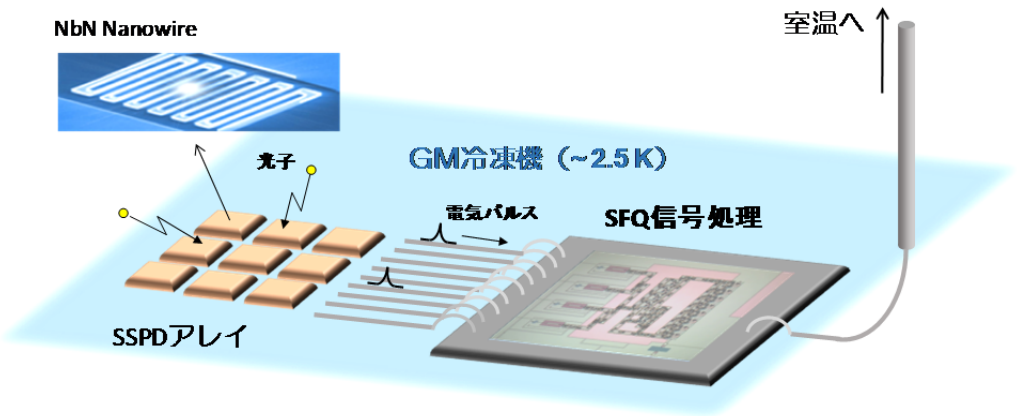


図 5 多ピクセル SSPD アレイと SFQ 信号処理の実装イメージ

© ISTEC 2014 All rights reserved.

受光面を N 分割すると、L_K が 1/N になる効果と、各ピクセルに光子が当たる確率が 1/N になる効果で、最大計数率は N^2 で改善する。従って、高速化については、16 ピクセル程度の SSPD アレイで 1 GHz 以上の最大計数率を達成できるだろう。一方、NICT ではイメージングが可能な 64 ピクセル SSPD アレイシステムを現在開発中であるが [21)]、この程度の規模のアレイになってくると、SFQ 信号処理の真価が発揮されるはずである。しかしながら、本格的なイメージングには数万～数百万ピクセルが必要であり、SFQ 信号処理を利用したとしても配線数の削減が重要課題となるであろう。このような課題を解決できれば、シングルフォトンイメージングという究極のカメラの実現も夢ではないかもしれない。

4.2 広波長帯域化

図 6 に SSPD に期待される応用分野を波長帯によって整理した。SSPD はこれまで通信波長帯を中心に開発が進められてきた。量子情報通信分野でのニーズがあるにもかかわらず、この波長帯に優れた光子検出器がなかったためである。しかしながら、1 □m 以下の波長帯については、PMT や Si SPAD という強力な競合技術があり、これまで本格的な研究開発が行われてこなかった。1550 nm での検出効率が 90%を超え、原理的に短波長でも同程度の検出効率は十分に達成できることから、今後 1 □m 以下の波長帯においても SSPD の応用が進むものと考えている。高い検出効率に加えて、SSPD には SPAD にないアフターパルスフリーという低ノイズ性や、1 GHz を超える高計数率という特長があり、ハイエンドな光子検出器として存在意義は十分にあると考えられる。

SSPD の広波長帯域化を実現するには、目標波長に応じた光キャビティ構造を如何に作り込むかが重要になる。1550 nm では図 3 (a)に示したダブルサイドキャビティ構造で、基板の裏面から光を入射していたが、1 □m 以下の光は Si に吸収されてしまうため同じ構造は利用できない。単純に誘電体の膜厚を目標波長に最適化するだけでなく、誘電体多層膜等を導入して光キャビティを設計・作製する必要があり、そのための光学設計技術も重要になってくるものと考えられる。SSPD の暗計数率を低減するには、室温の黒体輻射の影響を抑制する必要があるが[22]、誘電体多層膜をうまく設計することで、目標波長以外の光子をフィルタリングでき、暗計数率をさらに低減することも可能となるだろう。また、図 6 に示す応用の多くでは、自由空間からの光との結合が必要であり、コア径の大きいマルチモードファイバが用いられている。マルチモードファイバとの高効率な結合を実現するためには、SSPD の大面積化が必要であり、最大計数率の低下を余儀なくされる。高い計数率が要求される応用では、多ピクセル化がより重要になってくるかもしれない。いずれにしても、広帯域化により、通信分野だけでなく、バイオ・医療分野をはじめとするより幅広い応用展開が視野に入ってくるものと期待される。

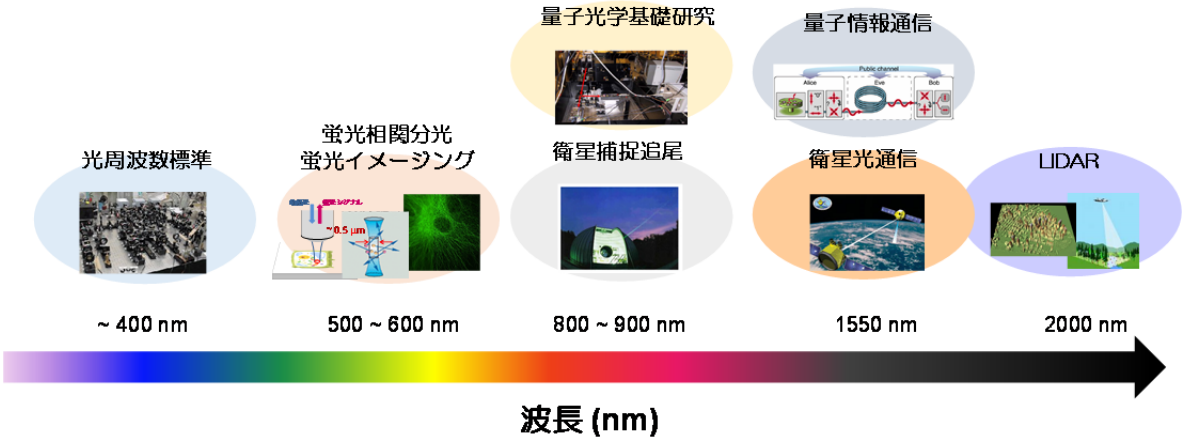


図 6　SSPD に期待される応用分野と波長帯

© ISTEC 2014 All rights reserved.

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

参考文献：

1) http://jp.hamamatsu.com/resources/products/etd/pdf/m-h7422e.pdf.
2) http://jp.hamamatsu.com/resources/products/etd/pdf/NIR-PMT_APPLI_TPMO1040E02.pdf.
3)http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/RelatedLinks/SpecificationSheets/SPC_PhotoDetectors.pdf.
4) C. Gobby, Z. L. Yuan, and A. J. Shields, Appl. Phys. Lett. 84, 3762–3764 (2004).
5) A. R. Dixon, Z. L. Yuan, J. F. Dynes, A. W. Sharpe, and A. J. Shields, Opt. Express 16, 18790–18797 (2008).
6) A. E. Lita, A. J. Miller, and S. W. Nam, Opt. Express 16, 3032–3040 (2008).
7) F. Marsili *et al*., Nature Photonics 7, 210, 2013.
8) http://www.nict.go.jp/press/2013/11/05-1.html.
9) G. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and R. Sobolewski, Appl. Phys. Lett. 79, pp. 705-707, 2001.
10) S. Miki, T. Yamashita, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, Opt. Lett. 35, 2133 (2010).
11) S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, and Z. Wang, Optics Express 21, 10208, 2013.
12) T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, and Z. Wang, Optics Express 21, 27177, 2013.
13) A. J. Kerman et al., Appl. Phys. Lett. 90, 101110, 2007.
14) D. Rosenberg, A. J. Kerman, R. J. Molnar, and E. A. Dauler, Optics Express 21, 1440, 2013.
15) A. J. Kerman, E. A. Daule, W. E. Keicher, J. K. W. Yang, K. K. Berggren, G. Gol'tsman, and B. Voronov, Appl. Phys. Lett, 88, 111116, 2006.
16) E. A. Daule, B. S. Robinson, A. J. Kerman, J. K. W. Yang, K. M. Rosfjord, V. Anant, B. Voronov, G. Gol'tsman, and K. K. Berggren, IEEE Trans. on Appl. Supercond., 17, pp. 279-284, 2007.
17) H. Terai, S. Miki, and Z. Wang, IEEE Trans. on Appl. Supercond. 19, 350, 2009.
18) H. Terai, S. Miki, T. Yamashita, K. Makise, and Z. Wang, Appl. Phys. Lett., 97, 112510, 2010.
19) S. Miki, H. Terai, T. Yamashita, K. Makise, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, Appl. Phys. Lett., 99, 111108, 2011.
20) T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise, and Z. Wang, Optics Lett., 37, 2982, 2012.
21) S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, and Z. Wang, Optics Express 22, pp. 7811-7820, 2014.
22) H. Shibata, K. Shimizu, H. Takesue and Y. Tokura, Appl. Phys. Express, 6, 072801, 2013.

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2014 All rights reserved.

2014 年 8 月 1 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

超電導センサ（その 4）－ 電波天文（ALMA）用受信機

独立行政法人　情報通信研究機構
テラヘルツ研究センター　テラヘルツ連携研究室
室長　鵜澤佳徳

1. はじめに

南米チリ共和国の北部、標高 5,000 m のアタカマ砂漠に誕生したアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（ALMA）は、東アジア・北米・欧州合同で建設した地上最大の電波望遠鏡である[1)]。2014 年 6 月に、ALMA 望遠鏡を構成する最後のアンテナとなる 66 台目が山頂施設（AOS）に到着した（図 1 の赤丸）。ALMA 望遠鏡の観測周波数は 31-950 GHz の「ミリ波、サブミリ波」で、各アンテナには、これを 10 の周波数帯に分割したバンド 1 からバンド 10 のヘテロダイン受信機が搭載される。各アンテナで受信した天体からの電波信号を「干渉」させることによって、66 台のアンテナ群をあたかも 1 つの大きな望遠鏡として動作させているため、「干渉計」と呼ばれる。干渉計は、望遠鏡の視力（解像度）が最も離れたアンテナ間の間隔（基線長 D）と観測波長 λ の比（λ/D）で決まる。ALMA は「大型」という名前の通り、最大基線長が 18.5 km（東京の山手線サイズ）、また観測波長を「サブミリ波」特にテラヘルツ（λ～300 μm）まで短くすることによって、高解像度を誇る「すばる望遠鏡」や「ハッブル宇宙望遠鏡」の約 10 倍高い解像度を実現する。さらに、感度も既存の電波望遠鏡の一桁以上上回る世界最高性能を実現し、これまで解明されなかった太陽系外の惑星系形成や宇宙初期の星や銀河の形成、そして生命の起源を含む宇宙の物質進化など、宇宙天文科学における重要な問題を次々と明らかにすることが期待されている。この実現のために受信機に課された性能は、これまでにない極めて高い感度や安定性（電気的、機械的にも）などであった。国立天文台では、バンド 4（125-163 GHz）、バンド 8（385-500 GHz）、バンド 10（787-950 GHz）用の超電導体―絶縁体―超電導体（SIS）受信機の開発・製造を担当した。各バンドの製造台数は全アンテナ台数分にスペア 7 台を加えた 73 台で、天文観測機器としては初の「量産」であった。2013 年度末までに 3 バンド分全ての受信機の製造・試験および ALMA プロジェクトへの出荷を無事終了し、国際公約を果たした。本稿では、筆者が開発に携わったバンド 4 およびバンド 10 受信機を例に、最新の天文観測用 SIS 受信機について紹介する。

図 1 標高 5,000 m のアタカマ砂漠に誕生した ALMA 望遠鏡（山頂施設の写真）。赤丸で示したアンテナが最後の 66 台目（欧州製）

© ISTEC 2014 All rights reserved.

2. ALMA 受信機と超電導技術

前述のように、ALMA の観測周波数は 31-950 GHz であり、これを大気の窓に対応する 10 の周波数バンドに分けて、バンド 1 からバンド 10 の受信機を各アンテナに設置して観測する（図 2）。現在の技術ではサブミリ波・テラヘルツ帯の信号を直接増幅することが難しい。そこで、アンテナで集めた受信信号と局部発振信号を「ミキサー」と呼ばれる非線形素子に通して、数 GHz-10 GHz 程度の低い周波数の信号に変換する。これをヘテロダイン変換という。ヘテロダイン変換された信号は中間周波（IF）と呼ばれ、昨今のマイクロ波技術で増幅が可能となる。ALMA のような究極の電波望遠鏡を実現するには、超高周波・超高感度ヘテロダイン受信機が必要であり、その心臓部であるミキサーでは、超電導薄膜、デバイス技術が中心的な役割を果たしている。

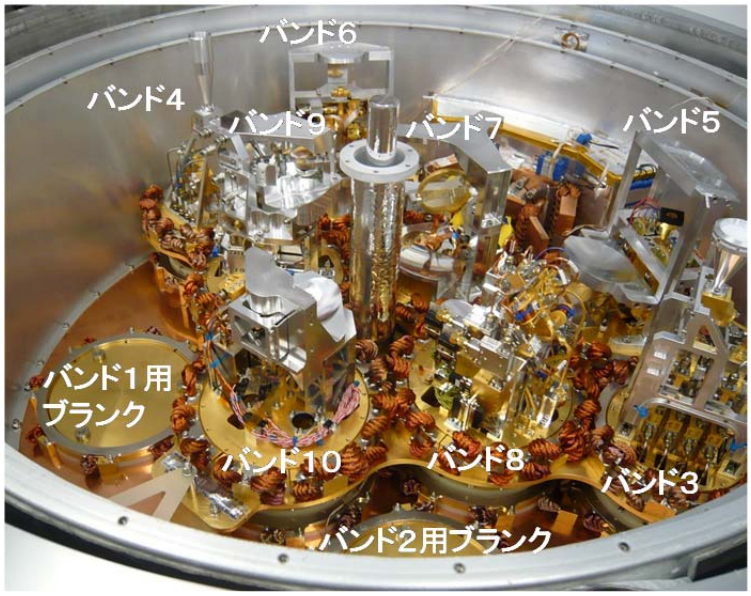


図 2　ALMA クライオスタットに搭載された受信機群。バンド 4、8、10 受信機の開発、製造は国立天文台が担当した。

超電導技術を用いた SIS ミキサーは、その電流-電圧（*I-V*）特性における強い非線形性などにより、原理的に理論限界の「量子雑音」に迫る究極的な高感度を達成できる [2)]。1970 年代後半にミリ波において SIS ミキサーの優れた低雑音温度性能が実証され、電波天文望遠鏡への応用可能性が拓けた [3), 4)]。特に、超電導材料としてニオブ（Nb）を用いた信頼性の高い超電導技術によって実用化に成功し、電波天文学が大きく発展してきた。この技術は ALMA 受信機にも用いられている。バンド 9（600-720 GHz）までの SIS ミキサーには、ミキサー素子を構成する SIS 接合や配線材料に全て Nb を用いている。ところが、バンド 10 では、この確立された Nb 技術を用いることはできない。それは、超電導材料に「ギャップ周波数」と呼ばれる材料固有の応答周波数限界があることに起因している。Nb のギャップ周波数は約 700 GHz であり、これ以上の周波数では、フォトンが超電導状態を破壊し、配線（高周波伝送線路部）の損失増加を引き起こす。この結果、伝送線路中で信号が減衰し、受信機の感度が極端に悪くなる。このためバンド 10 受信機では、SIS ミキサー素子の配線の一部をギャップ周波数が約 1.2 THz の窒化ニオブチタン（NbTiN）にすることによって、伝送線路の損失を低減しているのである [5)-7)]。高品質 NbTiN 薄膜の開発は、情報通信研究機構と国立天文台が協力して行い、超電導技術の実用化への新たな選択肢となっている。

また ALMA 望遠鏡では、超電導デバイスの作製技術の進歩から、高機能な SIS ミキサーを搭載することが可能となった。これはサイドバンド分離型（2SB）SIS ミキサーと呼ばれるものである [8)]。LO 信号周波数の高周波側の上側波帯（USB）と低周波側の下側波帯（LSB）を分離して独立に受信可能とするものだ。これには、特性の良く揃ったペアの SIS ミキサー素子が必要で、70 台以上の受信機を製造するためには相当量の素子が必要である。また後に示すように、複雑な導波管回路も必要となる。高精度なデバイス作製技術や機械加工技術によって 2SB ミキサーの量産が可能となった。この 2SB 方式による観測上のメリットは非常に大きい。図 3 に、ミキサー素子 1 個で受信可能な従来の両側波帯を重畳する DSB 方式と上述の 2SB 方式での輝線観測例を示す。DSB 方式では、

© ISTEC 2014 All rights reserved.

観測したい周波数帯だけでなく不要な周波数帯からも大気の電波吸収による雑音が入り込み、観測効率の劣化を招く。2SB 方式ではこれを避けることが可能なため、バンド 8 までの SIS 受信機では、2SB 方式を採用している。それ以上のバンド 9、10 では、DSB 方式となっている。この主な理由は、動作周波数が高いために金属導波管の損失の影響が無視できなくなり、受信機の感度が劣化してしまうためだ。しかし、このような高周波帯では水蒸気の電波吸収による大気雑音が増加することから、観測効率を上げるために 2SB 方式化が求められている。このために我々は、金属導波管壁に NbTiN を成膜することによって、導波管回路の損失を低減することを検討している [9)]。

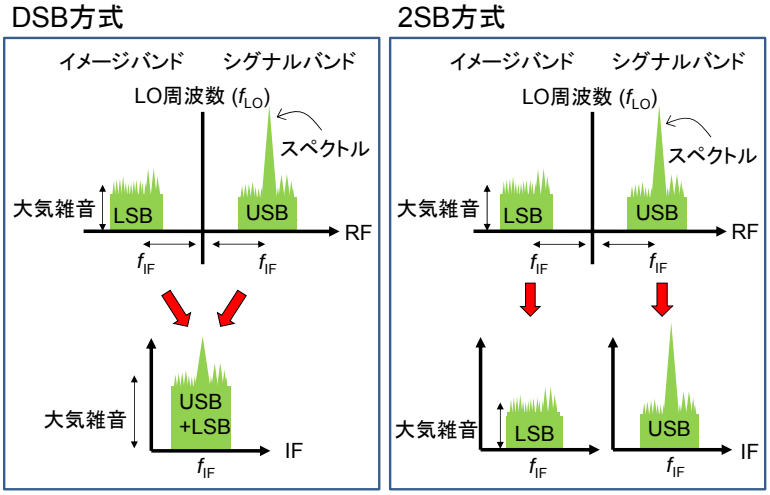


図 3　DSB 方式と 2SB 方式での信号検出感度の違い。2SB 方式はイメージバンドからの大気雑音の混入を避けることが可能なため、高い観測効率が得られる。

3. バンド 4 受信機

多くのバンドが採用している 2SB 方式の受信機について、バンド 4 受信機を例に説明する [10)]。図 4 に開発したバンド 4 受信機を示す。受信機は、英国ラザフォードアップルトン研究所（RAL）から供給された構造体を用いており、上部から直径約 140 mm の 4 K、15 K、110 K 冷却プレート（銅またはアルミ製）と室温の真空シールプレート（ステンレス製）、そしてこれらを支持する熱伝導率の低い繊維強化プラスチック（GFRP）製の円筒形構造体を有する。パラボラアンテナからの RF 信号は、クライオスタットに取り付けられた常温光学系を介してコルゲートホーンに入力される。その後、導波管直交偏波分離器（OMT）で 2 つの偏波

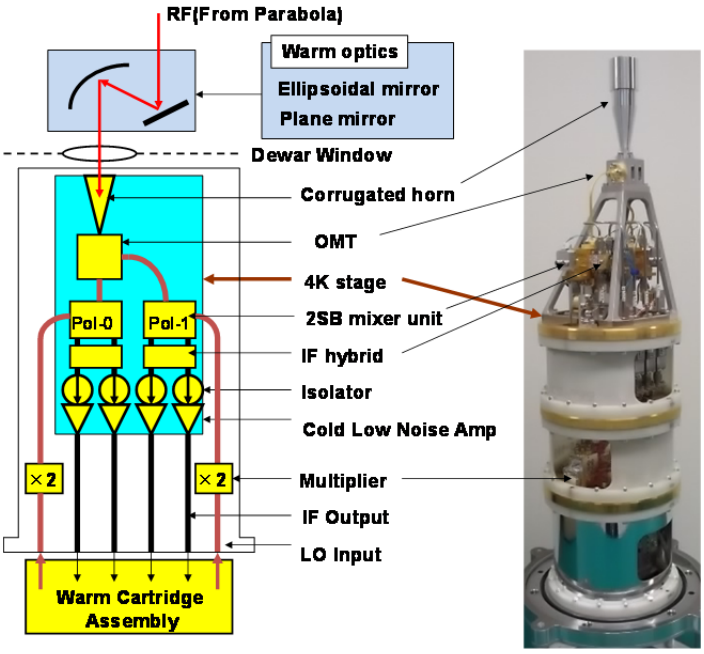


図 4　バンド 4 受信機のブロック図（左）と外観写真（右）

© ISTEC 2014 All rights reserved.

に分離され、それぞれの導波管 SIS ミキサーブロックへ入力される。各ブロックには、USB と LSB の側波帯分離を可能にするための導波管回路と SIS チップ 2 個が集積化されている。各 SIS チップからの IF 出力は、最終的に IF 帯 90 度ハイブリッドカプラーによって USB と LSB に分離された IF 信号となる。これらの IF 信号は、冷却アイソレーターを介して冷却低雑音 HEMT アンプで増幅される。コルゲートホーン以下のこれらの部品はすべて 4 K 部に設置されている。HEMT アンプからの出力は断熱同軸ケーブルなどにより、受信機外に取り出される。したがって、受信機からの IF 信号出力数は 2 偏波分の USB と LSB の合計 4 つとなる。

図 5 にバンド 4 導波管ミキサーブロックと SIS ミキサーチップの同調回路部を示す[10)]。ブロックには、高度な機械工技術を要する RF 帯 90 度ハイブリッドカプラーが集積化されている。これにより RF 信号は２つに分配され、それらの位相差は 90 度となる。一方、LO 信号は、電力分配器によって 2 つに同相で分配され、17 dB 方向性結合器を用いて上記のそれぞれの RF 信号に結合される。これらは独立した SIS チップで IF 信号に周波数変換される。この際、2 個の SIS ミキサーの特性が一致していると、高いサイドバンド分離特性が得られる。また、バンド 4 受信機の雑音温度仕様（2SB）は 51 K 以下（DSB 方式換算で $3hf/k_B$ 以下）と全バンドの受信機の中で最も厳しく、リーク電流の極めて低い接合特性が要求されている。我々は、臨界電流密度が約 3 kA/cm^2 の Nb/AlOx/Nb 接合を用いて 2 接合同調回路を設計し、4 K におけるサブギャップ抵抗対正常抵抗比（R_{SG}/R_N）が 20 以上となる SIS 接合を使用した。図 6 に代表的なヘテロダイン応答特性を示す。直流的には 2 接合同調回路が直列に接続されているため、ギャップ電圧は約 5.6 mV となっている。73 台の受信機を製造するためには、このような SIS チップを少なくとも 292 個（受信機 1 台当たり 4 個）準備する必要があった。図 7 に製造した全 73 台のバンド 4 受信機の雑音温度性能のまとめを示す。全ての受信機で ALMA の厳しい雑音温度仕様を達成している。

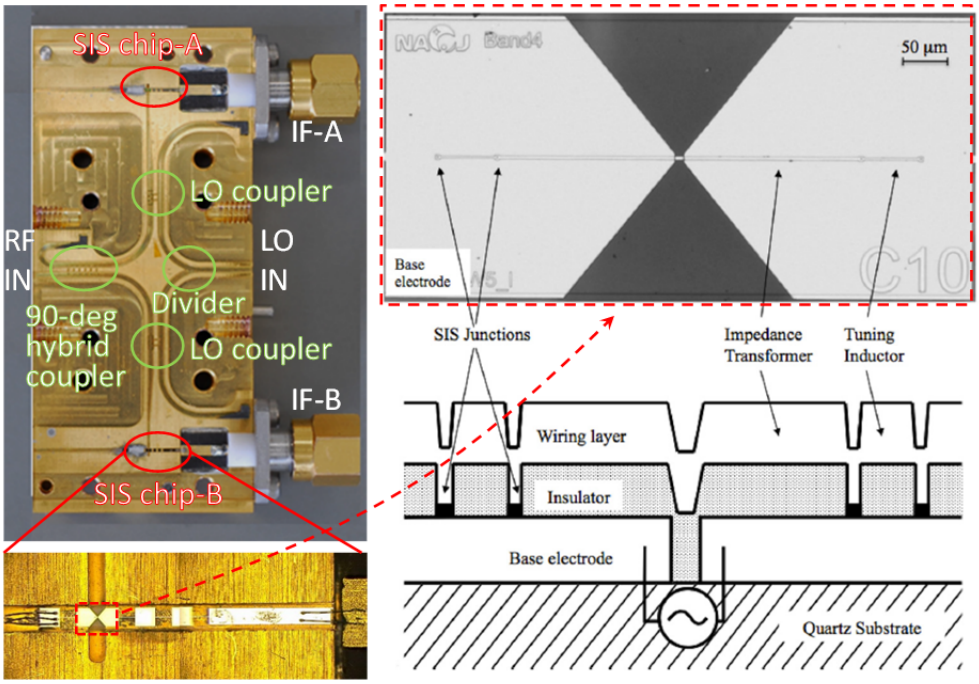


図 5　バンド 4 受信機の 2SB 方式用ミキサーブロック（左）と SIS チップ構造（右）

© ISTEC 2014 All rights reserved.

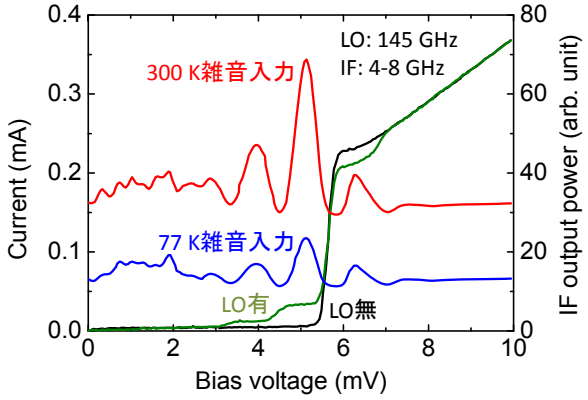


図 6 代表的なバンド 4 受信機のヘテロダイン応答特性

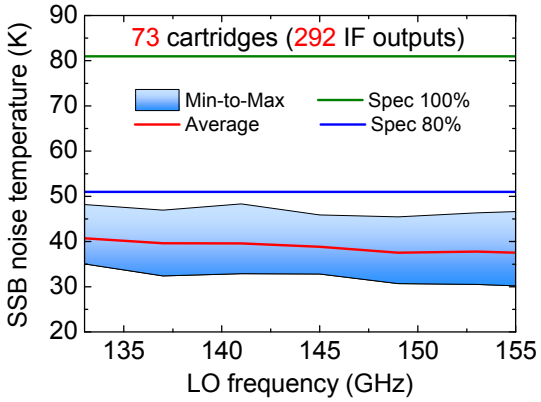
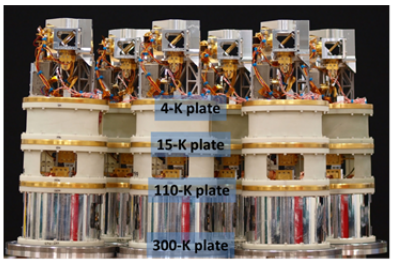


図 7 製造したバンド 4 受信機 73 台の雑音温度性能

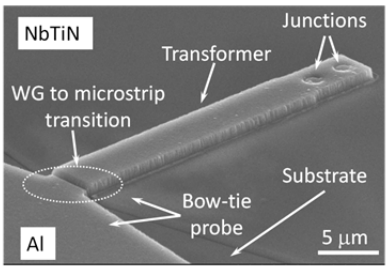
4. バンド 10 受信機

バンド 10 受信機は、バンド 9 受信機と同様に直交 2 偏波の DSB 受信機である [11), 12)]。図 8 に示すように、直径約 170 mm の 4 K、15 K、110 K の冷却プレートと室温の真空シールプレートを有している。パラボラアンテナからの RF 信号は、4 K 冷却部に設置された 2 枚の楕円鏡で集光され、自立型ワイヤーグリッドによって準光学的に直交 2 偏波に分離される。偏波分離された RF 信号は、それぞれの偏波用コルゲートホーンアンテナに入力される。各ホーンには、SIS ミキサーブロックが取り付けられている。各ブロックには、LO 信号受信用ダイアゴナルホーンと LO 信号を RF 信号に結合させるための 13 dB 方向性結合器が集積化され [13)]、SIS チップ（図 8 の走査型電子顕微鏡写真）1 個を用いて DSB 方式で RF 信号を IF 信号に周波数変換する。したがって、受信機からの IF 信号出力数は 2 偏波分の DSB となるため、合計 2 つとなる。

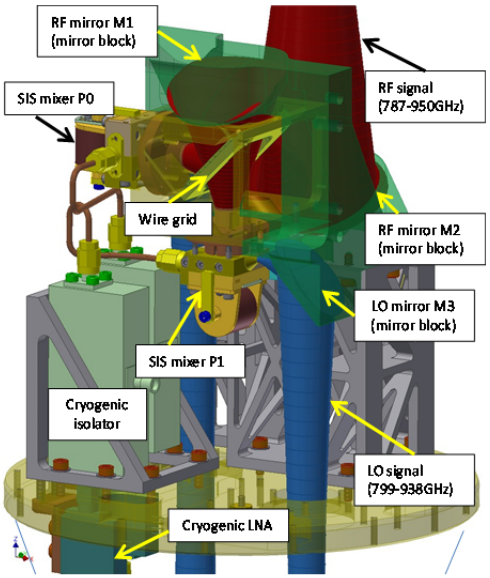
SIS チップには、前述したように NbTiN が伝送線路に用いられている。これまで他の研究機関でも 700 GHz 以上の高感度受信機用に NbTiN 薄膜が開発されてきたが、ALMA 受信機の厳しい雑音温度仕様を達成し、かつ「量産」も可能にする信頼性の高い薄膜技術はなかった。今回我々は、73 台の全ての受信機（146 個の SIS ミキサー）で、ALMA の雑音温度仕様に適合させることに成功した。



バンド10量産受信機



SISミキサーチップ電子顕微鏡写真



4 K冷却部

図 8　バンド 10 受信機の外観写真（左上）、4 K 冷却部の構成図（右）と SIS チップの電子顕微鏡写真（左下）

© ISTEC 2014 All rights reserved.

図 9 に、これまで報告されている SIS 受信機雑音温度（4 K 動作）と ALMA で課されているバンド 3 から 10 の雑音温度仕様（DSB 方式換算）を示すと同時に、バンド 10 受信機 73 台の測定で得られた各周波数での最小雑音温度のプロットを示す。我々の開発した受信機は、低い周波数帯の Nb 受信機と同様に量子雑音の 3 倍程度の感度にまで到達しており、世界最高性能を誇る。この結果は、Nb のギャップ周波数を超えるテラヘルツ帯において伝送線路の NbTiN が極めて低損失であることを示唆している。

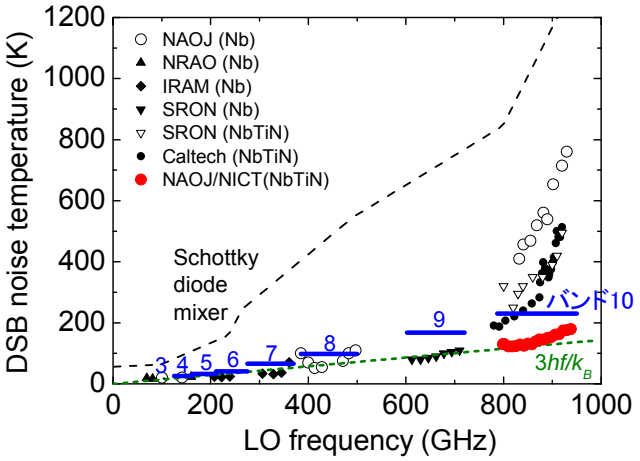


図 9　これまで報告されている代表的な SIS 受信機の雑音温度性能と ALMA の各バンドの SIS 受信機に対する雑音温度仕様

5. 今後の展望

日本における大型ミリ波サブミリ波干渉計計画の初期構想から 30 年が経過し、ようやく ALMA 望遠鏡は完成した。この間、超電導技術の進歩が電波天文学の発展をもたらし、また電波天文学からの科学的要請が超電導技術を大きく進歩させてきたといえる。この相互作用こそが「究極の望遠鏡、ALMA」完成への原動力となったことは間違いない。人類は、これまでにない高解像度・高感度観測を可能にする ALMA 望遠鏡を手に入れ、次々と新たな科学的成果を生み出し始めている。一方で、現在の ALMA 望遠鏡では不可能な観測性能が存在することにも気づいている。それは、視野の狭さである。電波干渉計におけるこの最後の弱点を克服するための検討が始まっている。例えば、受信機をマルチビーム化することが提案されている。このためには、超電導ミキサーの多素子化や集積化、これに伴い必要数が増大する IF 低雑音増幅器を低消費電力化する（超電導増幅器で？）など、新たな研究開発が必要である。この際、出力されるデータも膨大になることから、A/D 変換などの超高速超電導デジタル回路技術が有用となり得る。また既存観測方式においても、ALMA 望遠鏡での本格的観測が進んで行くに従って、バンド 10 周波数帯よりさらに高い周波数での観測要求が出てくる可能性は非常に高い。その候補として、1.4 THz 帯（1.25-1.55 THz）がすでに挙がっており、「バンド 11」と呼ばれている。この周波数領域は、バンド 10 受信機で用いた NbTiN 薄膜や Nb 接合の動作周波数限界を超えているため、新たな超電導材料による研究開発を必要としている。このように電波天文学が近未来に要請しているマルチビーム化、低消費電力化、高速化、高周波化などへ研究課題は、大容量・高速化を目指している超高速無線通信技術と同様のトレンドであり、共通点が多いことに気付く。筆者は、これまで培ってきた超電導技術と高度化した無線通信技術を融合させることによって、革新的な観測装置や計測装置などが生まれることを夢見ている。

参考文献：

1) http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/
2) J. R. Tucker, IEEE J. Quantum Electron. QE-15, 1234 (1979).
3) P. L. Richards, T. M. Shen, R. E. Harris, and L. Lloyd, Appl. Phys. Lett. 34, 345 (1979).
4) G. J. Dolan, T. G. Phillips, and D. P. Woody, Appl. Phys. Lett. 34, 347 (1979).
5) M. Kroug, A. Endo, T. Tamura, T. Noguchi, T. Kojima, Y. Uzawa, M. Takeda, Z. Wang, and W. Shan, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19, 171 (2009).

© ISTEC 2014 All rights reserved.

6) T. Kojima, M. Kroug, M. Takeda, Y. Uzawa, W. Shan, Y. Fujii, Z. Wang, and H. Ogawa, Appl. Phys. Exp. 2, 102201 (2009).
7) K. Makise, H. Terai, M. Takeda, Y. Uzawa, and Z. Wang, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21, 139 (2011).
8) S. Claude, C. Cunningam, A. R. Kerr, and S.-K. Pan, ALMA Memo 316 (2000).
9) 黒岩宏一 他、第 58 回応用物理学関係連合講演会, 25p-KJ-1（2011 年, 神奈川工科大学）.
10) S. Asayama, T. Takahashi, K. Kubo, T. Ito, M. Inata, T. Suzuki, T. Wada, T. Soga, C. Kamada, M. Karatsu, Y. Fujii, Y. Obuchi, S. Kawashima, H. Iwashita, and Y. Uzawa, Publ. Astron. Soc. Jpn, psu026 (2014).
11) Y. Fujii, M. Kroug, K. Kaneko, A. Gonzalez, Y. Uzawa, T. Kojima, K. Kuroiwa, A. Miyachi, K. Makise, Z. Wang, and W. Shan, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21, 606 (2011).
12) Y. Fujii, A. Gonzalez, M. Kroug, K. Kaneko, A. Miyachi, T. Yokoshima, K. Kuroiwa, H. Ogawa, K. Makise, Z. Wang, and Y. Uzawa, IEEE Trans. THz Sci. Technol. 3, 39 (2013).
T. Kojima, K. Kuroiwa, Y. Uzawa, M. Kroug, M. Takeda, Y. Fujii, K. Kaneko, A. Miyachi, Z. Wang, and H. Ogawa, J. Infrared Milli. THz Waves 31, 1321 (2010

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2014 All rights reserved.

2014 年 10 月 1 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

超電導センサ（その 5）–超電導検出器の計測分析への応用：X線、イオン、中性粒子

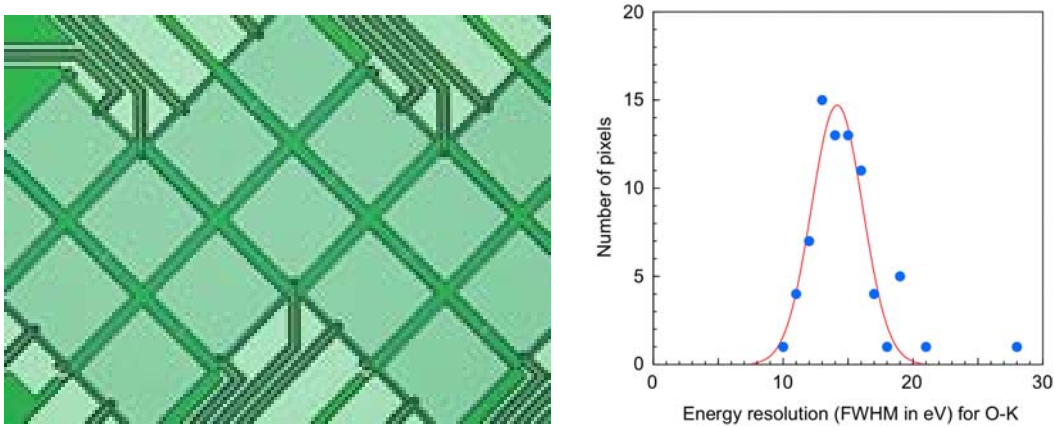
産業技術総合研究所
つくばイノベーションアリーナ推進本部
上席イノベーションコーディネータ　大久保雅隆

計測分析機器の性能には、観測対象を電気信号に変換する検出器の性能が大きく影響する。産総研で進めている X 線と分子検出への超電導検出器の応用と、超電導によってはじめて可能になる分析例を紹介する。現在、2 種類の超電導検出器を開発している：超電導トンネル接合タイプ(Superconducting Tunnel Junction: STJ)[1)]と超電導ストリップタイプ(Superconducting Strip: SS)[2)]。

STJ 検出器は、トンネル型のジョセフソン接合と同じ構造であるが、ジョセフソン効果を使用せず、サブギャップ領域の準粒子トンネル電流の変化から、観測対象の到来時刻と超電導電極に吸収されたエネルギーを測定する。即ち、1 個の光子やイオンのエネルギーを測定できるエネルギー分散分光能力を有している。計測分析では 1 つの接合面積が 100-200 μm 角と大きいことが、エレクトロニクス応用で用いられる 1 μm サイズのジョセフソン接合とは大きく異なる点である。計測分析では、有感面積が大きいことが実用化のために重要な要素となり、cm 程度の検出器サイズがほしいところである。大面積接合を多数配列したアレイ検出器が望まれる。同時に、微小な準粒子電流の変化を測定することと、読み出し系初段のプリアンプとのインピーダンスマッチングの関係から、トンネル接合の漏れ電流は、ジョセフソン効果の応用と比較して、3 桁程度小さい必要がある。検出器として動作させるためには、4 K と 0.3 K のサブギャップ電流の比は、10^6 程度（品質因子）が望ましい。開発開始当初は、100 素子のアレイを作製して希に 10 素子程度がその動作条件を満たすといった状況であったが、プロセス技術の改良により、最近ではルーチン的にほぼ全ての素子が検出器としての動作条件を満たせるようになってきた。現在は、100-500 素子レベルで再現性良く 10^6 の品質因子が得られている。この再現性は、従来産総研内に点在していた、超電導デバイス用のクリーンルームを集約したことも一役買っている。Clean Room for Analog-Digital Superconductivity (CRAVITY) という略称の新しいクリーンルームは、2012 年 11 月から運用を開始し、所内外に広く公開している。使用目的を問わないで超電導デバイスを作製できる。[3)]

我々は、STJ を X 線とイオン検出に用いている。X 線検出では放射光施設において、X 線吸収微細構造(X-ray Absorption Fine Structure :XAFS)分光に応用している。XAFS は、材料中原子の電子構造や原子周辺の局所配位構造を調べる方法で、半導体、触媒といった機能材料から自動車鉄鋼部品といった構造材料まで広く使われている。STJ 検出器は、従来分析が難しかった材料中の微量軽元素の局所配位構造や化学状態の解析を可能にする。これが可能になるのは、STJ 検出器が、一般的な Si(Li)半導体 X 線検出器に比べて一桁程度高いエネルギー分解能（～10 eV）を、軽元素の蛍光 X 線（*K* 線）のエネルギー領域（2 keV 以下）で有しているからである。STJ 検出器は、微量軽元素の弱い蛍光 X 線を、母材に含まれる他の軽元素や重元素の L 線、M 線から分離できる。この分解能を使って、SiC 中の微量窒素の XAFS 測定にはじめて成功した。[4)]　さらに、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)で必要とされる先端計測において、イオン加速器と組み合わせて、通常 Na 以上の元素分析に使われる粒子線励起 X 線分析(Particle Induced X－ray Emission: PIXE)において、微量軽元素（B, C, N, O）の元素マッピングを実現する予定である。

© ISTEC 2014 All rights reserved.



a)　　(b)

図 1 超電導トンネル接合 X 線検出器(STJXD)の外観（200 μm 角のアレイ） (a) と 100 素子のエネルギー分解能分布（100 μm 角）(b).[4)]

STJ のもう 1 つの応用は、質量分析用の検出器である。質量分析は、物質をイオン化後に数 keV に加速して、質量/電荷数比(*m/z*)に応じてイオンを分離分析する方法と定義されている。従って、今まで同じ *m/z* の異なるイオンは分離できなかった。例えば、N_2 をイオン化すると解離した N が大量に生成されるため、2 価の分子イオン（N_2^{2+}, *m/z*=14）は、1 価の原子イオン（N^+, *m/z*=14）に隠されて分離した実験例はなかった。STJ 検出器は、数 keV のイオンの運動測定が可能である。2 価イオンは 1 価イオンの 2 倍の運動エネルギーを有していることを利用して、STJ 検出器により、はじめて N_2^{2+}の分析に成功した。[5)]
2 価イオンは、解離するときに運動エネルギー放出により数 eV のエネルギーをフラグメントに与える。この運動エネルギーは惑星から大気が離脱する限界エネルギーを越える場合があり、惑星科学において 2 価イオンの検出が注目されている。また、STJ の運動エネルギー測定は、従来困難であった質量が異なる中性粒子の分離をはじめて実現し、イオン反応において従来不可能であった反応パスの定量的解析に成功している。[6)]

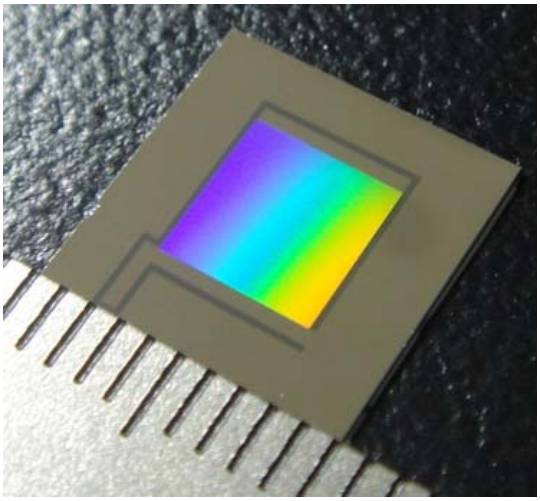


図 2 超電導ストリップイオン検出器(SSID)の外観。50 nm 厚、1 μm 幅の Nb ストリップ線を 5 mm に配置してある。可視光の回折により虹色に見える。

© ISTEC 2014 All rights reserved.

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

超電導ストリップイオン検出器(SSID)は、超電導体を膜厚 5-50 nm、幅 1 μm 以下程度のナノスケール構造をもつストリップ線から構成される。STJ イオン検出器は、前述のような従来の分析手法の原理的限界を克服することができる。しかしながら、応答時間が～μs であり、飛行時間型質量分析で望ましい～ns の応答を実現することが難しかった。我々は、そこで通信波長帯の高速光子検出として注目されていた SS 検出器を使って、はじめてイオン検出に応用した。[7] この検出器は、超電導ストリップ線を特殊な並列配置にすることにより、cm サイズの有感面積と 1 ns の高速応答を実現できると期待されている。[2] 図 2 に、5 mm 角の SSID の例を示す。基本的に SSID は、単一イオンのカウンターとして働くが、素子のバイアス条件を変えることにより、検出可能下限エネルギーを変えることができ、イオンの価数識別を行うことができる。[8] また、動作温度が 0.3 K の STJ に比べて、4 K 以上でも動作するというメリットがある。近年、高温超電導体の MgB_2 でもイオン検出に成功しており、より高温での動作により、検出システムのサイズの小型化や低価格化が期待される。さらに、SSID と SFQ による時間–デジタル変換回路(TDC)を組み合わせて、イオンの飛行時間をデジタル値に変換することに成功している。[9] 4 K と室温間に多数の同軸ケーブルを敷設することなく、SSID アレイによる、cm の有感面積と 1 ns の時間分解能、分子量に依存しない 100 %の検出感度を達成できると考えられる。

超電導現象を使ったセンサーと検出器の最新動向については、2014 年 11 月 4 日から 8 日まで上海で開催される**国際ワークショップ(IWSSD2014)**[10]に出席いただきたい。また、同会議では、IEC-IEEE の標準化セッションも設定されており、ユーザーや超電導デバイスの普及のための議論が行われる。

1. M. Ohkubo, S. Shiki, M. Ukibe, G. Fujii, and N. Matsubayashi, IEEE Trans. Appl. Super. **24**, 2400208 (2014).
2. N. Zen, S. Shiki, M. Ukibe, M. Koike, and M. Ohkubo, Appl. Phys. Lett. **104**, 012601 (2014).
3. https://unit.aist.go.jp/riif/openi/cravity/ja/index.html
4. M. Ohkubo, S. Shiki, M. Ukibe, N. Matsubayashi, Y. Kitajima, and S. Nagamachi, Sci. Rep. **2**, 831 (2012).
5. S. Shiki, M. Ukibe, Y. Sato, S. Tomita, S. Hayakawa, and M. Ohkubo, J. Mass Spectrom. **43**, 1686 (2008).
6. M. Ohkubo, S. Shiki, M. Ukibe, S. Tomita, and S. Hayakawa, Int. J. Mass Spectrom. **299**, 94 (2011).
7. K. Suzuki, S. Miki, S. Shiki, Z. Wang, and M. Ohkubo, Appl. Phys. Exp. Appl. Phys. Exp. **1**, 031702 (2008).
8. K. Suzuki, M. Ohkubo, M. Ukibe, K. Chiba-Kamoshida, S. Shiki, S. Miki and Z. Wang, Rapid Commun. Mass Spectrom. **24**, 3290 (2010).
9. K. Sano, *et al*., ASC2014.
10. http://iwssd2014.csp.escience.cn/dct/page/1

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2014 All rights reserved.

2014 年 12 月 8 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

超電導センサ（その 6）– 超電導遷移端型センサの原理と応用

首都大学東京 大学院
理工学研究科 物理学専攻
准教授　江副 祐一郎

本特集の第 6 回では、超電導遷移端での急激な抵抗変化を温度計として利用するセンサ、いわゆる TES (Transition Edge Sensor) の原理と応用について紹介する。

1. 原理と利点

TES は光や粒子を熱量測定によって捉える検出器の一種である [1,2]。原理を図 1 に示す。一つ一つの光子や粒子のエネルギー量子 E を検出するものをカロリメータ、一つ一つを区別せず吸収したパワー P を計測するものをボロメータと呼ぶ。温度計として超電導遷移端の抵抗変化を用いるものが TES であり、温度増加はカロリメータの場合には E/C、ボロメータの場合には P/G となる。吸収された熱は熱浴へと一定の時定数で逃げて行く。カロリメータの場合の温度変化を図 1 に示した。

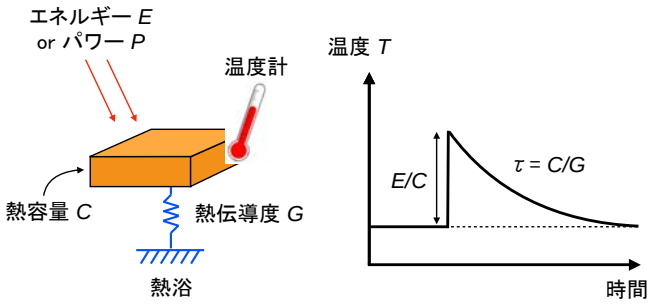


図 1. センサの原理とカロリメータの温度変化。

TES の温度抵抗特性の例を図 2 に示す。温度計感度 $\alpha = d \log R / d \log T$ は 10~1000 程度と大きい。転移温度は近接効果を使って、超電導金属と常伝導金属の二層薄膜（Ti/Au, Mo/Au など）の膜厚比を変えることで制御する。α の制御はより困難であるが、近年、米 NIST による研究で TES 上に常伝導金属のバー構造を付けて、電流の流れ方を制限することで制御できることが分かってきた [3]。

超電導遷移端上に状態を維持するため、TES は擬似的な定電圧バイアスをかけて動作させる（図 2）。光や粒子との相互作用によって、素子の温度が上昇すると、TES を流れる電流が減少しジュール発熱が減ることで元の温度に戻るため、安定的に使用できる。これを電熱フィードバックと呼ぶ。温度変化の減衰の時定数は、カロリメータでもボロメータでも、実効的に $\tau_{eff} \sim C/G * n/\alpha$ となる。ただし n は熱伝導度の温度依存性 (G ∝

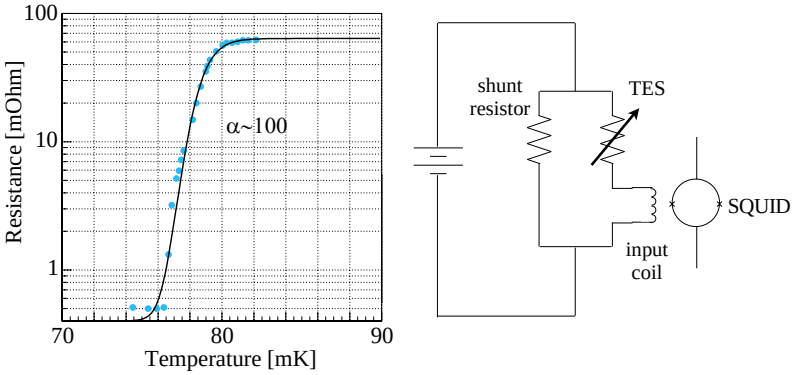


図 2. TES の温度抵抗特性と電熱フィードバック。

© ISTEC 2014 All rights reserved.

T^n) による項であり 3~5 程度である。つまり電熱フィードバックによって信号は速くなる。たとえば C = 1 pJ/K、G = 1 nW/K、α=50 では ~80 μs であり、高速計数が可能である。

τ_{eff} の逆数で決まる周波数帯域 $\omega<1/\tau_{eff}$ において、TES のノイズ等価雑音 (NEP) は原理的に、熱リンクを通したランダムな熱入出力、いわゆるフォノン雑音が支配的となる。これは $(4\ k_B T_B G \gamma)^{1/2}$ [W/Hz$^{1/2}$]（ただし γ~1, $\omega<1/\tau_{eff}$）と書ける。つまり低温かつ小さな G とすることで超低雑音となる。たとえば T_B = 300 mK、G = 10 pW/K では NEP は ~1x10^{-17} [W/Hz$^{1/2}$] である。特筆すべきは G を小さくしても、α が大きいため、τ_{eff} は小さく、高速な応答が可能であることである。これは TES ボロメータの大きな利点となっている。

カロリメータとして用いる場合、原理的なエネルギー分解能は $2.35\,\xi\,(4k_B T_B^2 C)^{1/2}$ [J]（ただし $\xi \propto 1/\alpha^{1/2}$）と書ける。たとえば T_B = 100 mK、C = 1 pJ/K、α=50 では ~2 [eV] となる。5.9 keV X 線に対するエネルギー分解能で比較すると、これは半導体検出器より約 70 倍優れている。また TES よりも早くから開発されてきた半導体温度計型カロリメータと比べても約 2 倍優れている。ただし、超電導遷移端を超えるとエネルギー分解能は上の式よりも悪くなるため、最大エネルギーには E_{sat} ~ CT/α という条件が課される。上のパラメータでは E_{sat} ~ 13 [keV] である。

読み出し回路からの利点として、TES は低インピーダンスであり、初段の増幅器として SQUID を利用できることが上げられる。TES の信号帯域幅は典型的に数 ~ 数十 kHz であり、SQUID の帯域幅 ~GHz と比べて十分小さい。そのため時分割、周波数分割など様々な手法で信号を多重化して読み出すことが可能である。よって、1000 pixel を超えるような巨大なアレイも、読み出し配線を過度に増やさず、現実的な冷凍機リソースで実現することができる。

TES に対して、半導体温度計型カロリメータやボロメータでは高インピーダンスのため、JFET を使った 1 pixel 毎の読み出しが必要である。2015 年度打ち上げの日本の X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載される半導体温度計型カロリメータは 6x6 pixel であり、5.9 keV でのエネルギー分解能は 5 eV 程度である [4)]。これは従来の半導体検出器と比べて画期的であるが、TES はさらのその先の性能、たとえば ~1000 pixel, ~2 eV を実現しうるデバイスであることが分かる。

2. 応用

TES の代表的な応用例を表 1 にまとめた。近赤外線から可視光、X 線、γ 線までの単一光子検出器、mm・sub mm 波に対するエネルギー流量検出器、さらには暗黒物質探査まで、非常に幅広く活用されている、もしくは活用されようとしていることが分かるであろう。

表 1. TES の代表的な応用例

方式	応用例
カロリメータ	天文 (X 線), 量子暗号 (可視光, 赤外線), 微量分析 (X 線), 核物質分析 (γ 線)
ボロメータ	天文 (sub-mm, mm 波), 宇宙マイクロ波背景放射 (mm 波), 暗黒物質 (粒子)

これらの応用例において、TES センサの性能は理論値に近づきつつある。例として図 3 に米 NASA GSFC がまとめた X 線用 TES カロリメータの単一 pixel での 5.9 keV X 線に対するエネルギー分解能の変遷を示す。現在の世界記録は NASA GSFC が達成した 1.6 eV であり、ほぼ理論通りの性能が出ている。一方、我々首都大、JAXA 宇宙研を中心とするグループの記録は 2.8 eV であり [6)]、世界記録に迫っているが、まだ改善の余地がある。アレイとしては、将来 X 線天文衛星用のもので ~1000 pixel が開発されている。 読み出しとしては、米 NIST の時分割信号多重化 SQUID を用いた 16 pixel 同時読み出しで 2.9 eV が達成されている。

© ISTEC 2014 All rights reserved.

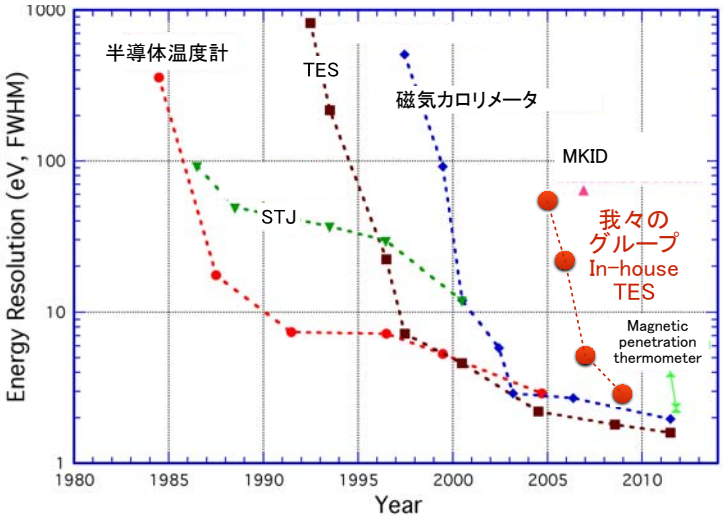


図 3. X 線用 TES カロリメータ等のエネルギー分解能の変遷 [5]。我々のグループの自作素子の変遷を重ねた。

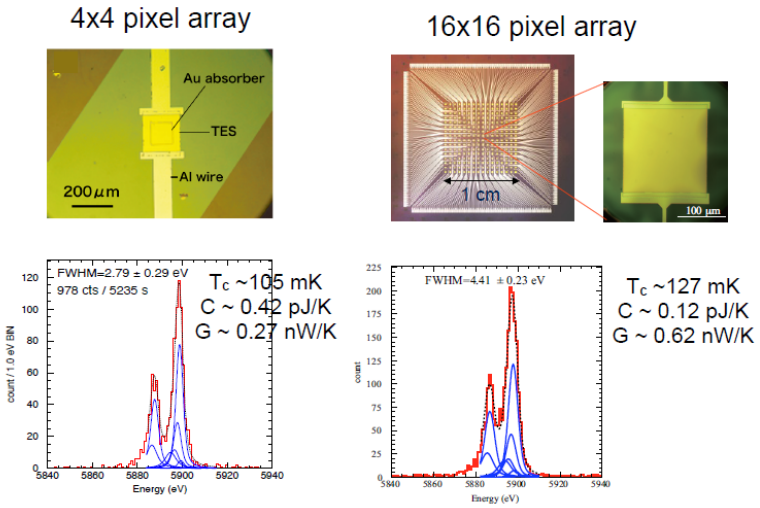


図 4. 自作した X 線用 TES カロリメータの例。

TES ボロメータでも sub-mm 波天文用で理論限界に迫る NEP が実現できており [7]、アレイとしても 数百~10000 pixel が製作されてきている [7-8]。X 線用と比べ、時定数が比較的遅く (~ms)、信号多重化がより容易であることが、X 線用よりも巨大なアレイが先に実現された主な理由と思われる。また極低雑音が必要な宇宙マイクロ波背景放射の観測でも巨大アレイが求められていることから、TES ボロメータが近年、多く採用されてきている [9]。

天文だけでなく地上向けにおいても TES の応用例は枚挙にいとまがない。たとえば微量分析用に電子顕微鏡の EDS [10]や、近赤外線領域での量子暗号通信 [11]などである。

特筆すべきは、こうした分野で日本のさまざまなグループが世界と肩を並べて、TES 開発を行っていることである。そのような中、恐縮ではあるが、以下では紙面の都合から我々、首都大・JAXA 宇宙研が中心となって開発している X 線天文用の TES カロリメータを紹介させて頂きたい。

我々の目標の一つが、宇宙の大規模構造に沿って存在すると考えられる未発見の通常物質（ダークバリオン）の解明を目指した日本の将来衛星計画 DIOS である [12]。ダークバリオンの検出には 0.3-1.5 keV のエネルギー範囲で、優れたエネルギー分解能 (<~5 eV) と大面積（1 cm 角）を兼ね備えた検出器が必要であり、これらの要求を満たすことができるのが TES カロリメータである。

我々のグループでは首都大・宇宙研・産総研の装置を用いて、2004 年から本格的にインハウスで素子製作を行ってきた。さらにセイコーや三菱重工、フォトプレシジョンなどにご協力頂いて、配線や吸収体技術等を共同で開発している。図 4 に例を示す。前述の通り、単一 pixel でのベストエネルギー分解能は 5.9 keV X 線に対して 2.8 eV（TES 200 μm 角, 吸収体 Au 120 μm 角, 1.6 μm 厚）であり [5]、アレイでは 16x16 pixel 中の 1 pixel に対して 4.4 eV（TES 180 μm 角, 吸収体なし）を達成している [13]。

© ISTEC 2014 All rights reserved.

これらの経験と実績に基づき、我々は現在 DIOS に向けたアレイ製作のため必要な要素技術、配線[14]と吸収体[15]の開発を進めている。図 5 に試作品を示す。

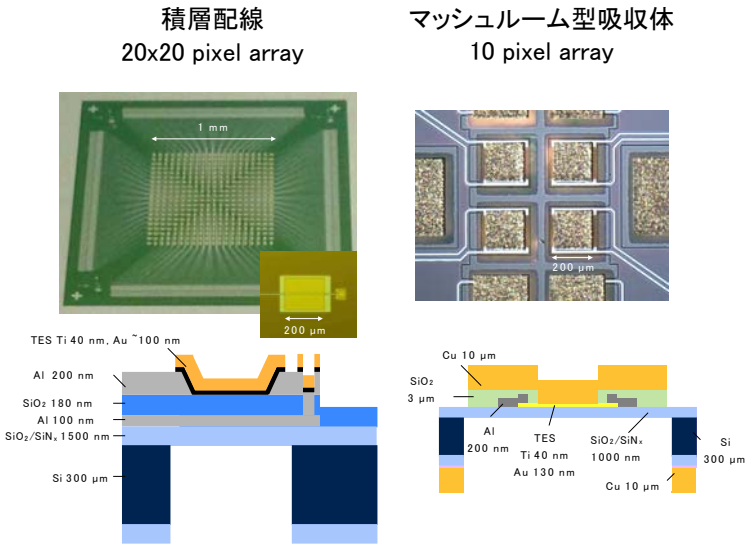


図 5. 積層配線およびマッシュルーム吸収体の試作品と断面図。断面図の数字は厚みを表す。

鍵となる技術の一つが配線である。エネルギー分解能と面積を両立するため、DIOS では 20x20 pixel アレイを採用することを考えており、TES サイズは 250 μm、TES pixel 間の間隔は 500 μm である。ここに多数の配線を並べると相互インダクタンスによる cross talk によってエネルギー分解能が劣化しうる。そこで Hot と Return の配線が正確に上下に重なった積層配線が必要となる。我々は産総研 CRAVITY を利用させて頂いて、共同で試作を進めており、転移特性の良好な配線の形成に成功してきている。現在は TES を配線上に形成して、転移特性やエネルギー分解能を調べる段階に来ており、完成まであと少しである。

もう一つの鍵技術が吸収体である。DIOS で要求されるこれまでにないエネルギー分解能と面積を両立するためには、できるだけ熱容量を抑えつつ、吸収体の受光面積を増やす必要がある。そこで TES（250 μm 角）よりも 2 倍大きなマッシュルーム吸収体を目指して、電析 Cu や電析 Bi を使った吸収体の製作をフォトプレシジョンなどと協力して進めており、目処を付けつつある。

これらの要素技術を組み合わせて製作した TES カロリメータアレイを、JAXA 宇宙研で開発中の周波数分割方式の読み出し回路と合わせることで、世界最高感度の X 線天文用 TES カロリメータを完成し、2020 年代前半に打ち上げを目指す予定である。

最後に TES は応用性の広さから米では NIST と NASA GSFC が協力して開発を進めるなど、地上・天文を超えた共同研究が進んでおり、世界的な競争が激しさを増している。日本でもこうした分野を超えた共同研究の動きは既に始まっているが、この流れをさらに加速させ、目的とする応用をいち早く実現してゆくことが鍵になるかと思われる。

なお TES の先を目指した開発も始まっていることも追記しておきたい。mm, sub-mm 波天文では Microwave Kinetic Inductance Detector（通称 MKID, 2014 年 2 月号の有吉さん他による解説を参照[16]）を使った ~1 Mpix を目指した新たな開発が進められている。また X 線天文でも TES や磁気カロリメータを MKID と同様に microwave resonator と結合させ、さらに GHz 周波数分割 SQUID と組み合わせて、より巨大なアレイを実現する動きが出てきており、こうした二歩先にも目を向けて開発を推進してゆくことが大事になるかと考えている。

© ISTEC 2014 All rights reserved.

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP　Tel: 044-850-1612

参考文献：

1) K.D. Irwin and G.C. Hilton, “Transition-Edge Sensors”, chapter in Cryogenic Particle Detection, C. Enss (Ed.), Topics in Applied Physics, vol. 99, p.63 (2005).
2) 江副 祐一郎, 篠崎 慶亮, 竹井洋, “進化するＸ線マイクロカロリメータ –Ｘ線分光で解き明かす宇宙の大規模構造 –”, 日本物理学会誌, 実験技術, 8 号, p.611 (2009).
3) J.N. Ullom, *et al*., “Characterization and reduction of unexplained noise in superconducting transition edge sensors”, Appl. Phys. Lett., vol. 84, p. 4206 (2004).
4) 石崎 欣尚, “宇宙用Ｘ線マイクロカロリメータ検出器”, 応用物理学会放射線分科会誌「放射線」, vol. 37, p.217 (2011).
5) S. Bandler, “Large-Format High Resolution X-ray Microcalorimeter Arrays”, Astrophysics Roadmap Town Hall Meeting (2013).
https://scienceworks.hq.nasa.gov/web/astrophysics-roadmap/home
6) H. Akamatsu, *et al*., “Impedance measurement and excessnoise behavior of a Ti/Au bilayer TES calorimeter”, AIP Conf. Proc., vol. 1185, p.195 (2009).
7) W.S. Holland, *et al*, “SCUBA-2: the 10000 pixel bolometer camera on the James Clerk Maxwell Telescope”, MNRAS, vol. 430, p.2513 (2013).
8) T. Oshima, *et al*., “Development of TES Bolometer Camera for ASTE Telescope: I. Bolometer Design”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, 2101004 (2013).
9) D. Benford, H. Moseley, and J. Zmuiidzinas, “Direct Detectors for the Einstein Inflation Probe”, J. of Phys., Conf. Series, vol. 155, 012001 (2009).
10) T. Hara, *et al*., “Microcalorimeter-type energy dispersive X-ray spectrometer for a transmission electron microscope”, J. Electron Microscopy, vol. 59, p.17 (2010).
11) D. Fukuda, *et al*., “”High speed photon number resolving detector with titanium transition edge sensor”, J. Low. Temp. Phys., vol. 151, p.100 (2008).
12) T. Ohashi, *et al*., “DIOS: the dark baryon exploring mission”, SPIE, vol. 9144, 91442Q, (2014).
13) Y. Ezoe, et al., “Large arrays of TES Xray Microcalorimeters for Dark Baryon Search”, AIP Conf. Proc., vol. 1185, p. 60 (2009).
14) Y. Ezoe, et al., “Tapered Edge Readout Wiring for Transition Edge Sensor Calorimeter Arrays Using Ion Milling”, IEEE Trans. Appl. Supercond., in press.
15) 永吉賢一郎, “検出効率の飛躍的向上を目指したマッシュルーム型吸収体TES型Ｘ線マイクロカロリメータの開発”, 修士論文, 東京大学 大学院 理学系研究科 物理学専攻 (2013).
16) 有吉誠一郎ほか, “特集:超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス 「MKIDs イメージングの最新動向」”, 超電導 Web21, 2014 年 2 月号.

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2014 All rights reserved.