

光子・粒子・電磁波用超伝導検出器の画素数を飛躍的に増大する読出回路 — 新回路で、小型・低消費電力・廉価な汎用型高性能計測器の実現へ —

平成 30 年 2 月 1 日

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

国立大学法人 東京大学

■ ポイント ■

- ・ 高性能計測器の小型化・低消費電力化・低廉化に向け、超伝導検出器用の信号読出回路を開発
- ・ 周波数変換の工夫で 1 本の読出配線上へ多重化できる信号数を増やし、大幅な多画素化を可能に
- ・ 室温検出器を凌駕する性能で、分析電子顕微鏡、光子顕微鏡、放射線分光器などへの応用に期待

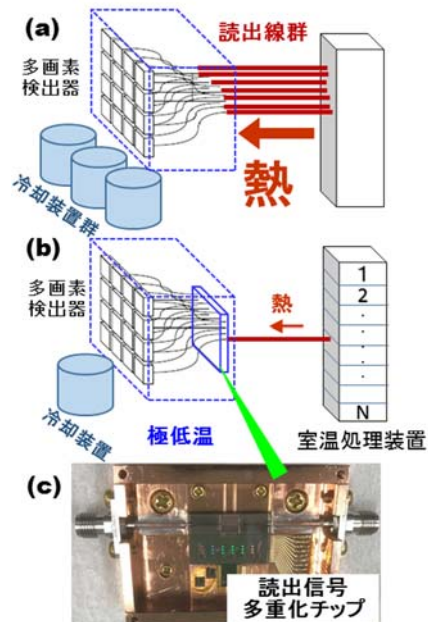
■ 概要 ■

国立研究開発法人 産業技術総合研究所【理事長 中鉢 良治】(以下「産総研」という)ナノエレクトロニクス研究部門【研究部門長 安田 哲二】超伝導計測信号処理グループ 山森 弘毅 研究グループ長、平山 文紀 主任研究員、神代 暁 研究グループ付は、東京大学【総長 五神 真】(以下「東大」という)大学院工学系研究科原子力専攻 大野 雅史 准教授、高橋 浩之 教授と共同で、超伝導検出器に関し、1 本の読出線上に従来の 5 倍となる 1000 画素以上の信号を載せることができる技術を開発した。

超伝導検出器は、単一光子・粒子のエネルギーや微弱電磁波強度の精密計測が可能であり、宇宙から到来する微弱電磁波の長時間・精密観測などに利用されているが、計測時間短縮に必要な多画素化が遅れている。その主因は、極低温の多画素検出器と室温処理装置をつなぐ読出線に載せられる画素数が限られるからである。多画素化のために読出線の数を増やすと、読出線経由の流入熱が増えて冷却装置の強化が必要となり、計測器全体の体積・消費電力・価格の上昇につながる。今回開発した技術は、複数の室温信号処理装置を並列動作させ、室温処理装置ごとに全画素の情報を異なる周波数帯に変換し、まとめて 1 本の読出線上に載せるものである。載せられる画素数が飛躍的に増大し、超伝導検出器を用いる分析電子顕微鏡、放射線分光器、光子顕微鏡などの計測時間短縮や、小型化・低消費電力化・低廉化が期待される。

なお、この技術の詳細は、2018 年 2 月 1 日(現地時間)に学術誌 Superconductor Science and Technology に掲載される。

_____は【用語の説明】参照



多画素超伝導検出器を用いる計測器 (a)多重化なし (b) 多重化 (c) 超伝導検出器と多重化チップの実装モジュール;全体が摂氏マイナス 273 度に冷却される。

■ 開発の社会的背景 ■

超伝導検出器は、低周波磁界、ミリ波から X 線・ガンマ線までの電磁波やエネルギー粒子を低雑音で検出でき、室温動作の半導体検出器などを凌駕するので、脳磁計、心磁計、分析電子顕微鏡、天文観測用受信器などで用いられている。しかし、室温検出器に比べて、受光面積が 2~3 桁小さく、入射信号の検出効率が 2~3 桁低い。そのため、少数の画素を走査しながらの撮像(イメージング)となり、一般に室温検出器に比べて、測定時間が 2 桁程度長くなる。これらの問題を解決するには検出器の多画素化が必要とされる。しかし、高速信号をリアルタイムに読出せるように、極低温に置かれた多画素検出器と室温の信号処理装置をつなぐ配線を増やし、これを並列接続することで画素数を増やすと、配線経由の流入熱が増える(図 1: 点線 a)。そのため極低温冷凍機の強化(大型化または多数化)が必要となり、検出器システムの大型化により、消費電力が増加し、価格も上昇する。さらに、極低温下で、複数の画素信号を画素ごとに異なる周波数に変換して多重化して配線数を減らす超伝導周波数多重読出回路も研究されてきたが、従来技術では、1 本あたり 1000 以上の多画素化は困難であった。しかし超伝導検出器も 1000 画素集められれば、市販半導体検出器と同等の受光面積が可能となり、同一測定時間での比較で、遥かに優れた分光性能が実現できる。これにより、例えば、材料評価用の分析器の革新的目標である、高い物質同定能力と高いスループット(単位時間あたりのデータ処理能力)の両立が期待されている。

■ 研究の経緯 ■

産総研と東大は共同で、超伝導検出器の出力周波数を、汎用部品で取り扱えるマイクロ波に変換し、画素ごとに異なる周波数の信号として 1 本の読出線上で多重化するためのマイクロ波帯周波数多重読出回路の研究に取り組んで成果を上げてきた。

本研究開発はこの取り組みの一環であり、日本学術振興会科学研究費助成事業基盤研究 A(平成 27 年度~29 年度)による支援を受けた。

■ 研究の内容 ■

マイクロ波帯周波数多重読出回路では、超伝導検出器からの低周波出力を、小型機器での低雑音処理がしやすいマイクロ波帯へと、一旦、周波数を上げ、一部の信号処理や増幅の後、室温処理装置での信号処理のため低周波に戻す。図 2 に模式的に示すように、従来のマイクロ波帯周波数多重読出回路(図 2(a))では、室温処理装置の制約が、多重化可能な画素数を限定していた。この制約を無くすために、従来は単一であった低周波とマイクロ波の間の変換の基準周波数を、今回の技術では室温処理装置ごとに個別の値に設定した。幅広い周波数帯域の電

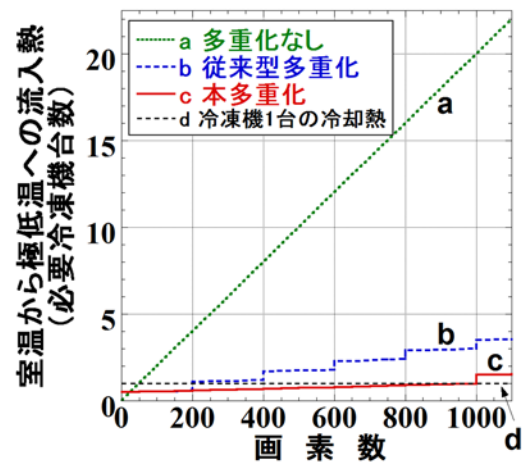


図 1 超伝導検出器の画素数と、室温から極低温への流入熱との関係

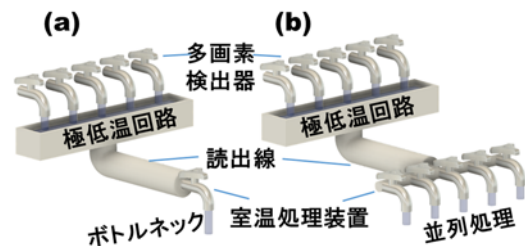


図 2 情報量を水量に例えたマイクロ波帯周波数多重回路の模式図: (a) 従来型 (b) 新型

気信号へと変換されているので、各周波数帯域用の室温処理装置を複数並列化することで、全ての画素からの信号を1本の読出線で扱えるようになった。

図 2(b)で模式的に示した新規多重読出回路の具体的構成を、図 3 に示す。この読出回路は、図の中央に四角型点線で囲んだ極低温回路と、その外側の複数 (N 個) の室温処理装置から成る。室温処理装置に設置された N 個の任意波形発生器群で、それぞれ M 個の異なる種類の低周波信号を発生させ、各信号を周波数上方変換器群でマイクロ波に変換する。さらに超伝導検出器に接続された超伝導多重化チップ内で、この $N \times M$ 個の種類のマイクロ波信号の振幅と周波数を、各画素からの信号の大きさに基づいて変調させる。この二段階の多重化により、全画素からの信号をすべて異なる周波数のマイクロ波信号に変換できるので、1本の配線を通してマイクロ波信号を極低温回路に導入するとともに、1本の読出線で全信号を室温側に取り出すことができる。取り出された信号は、室温処理装置群の周波数下方変換器群と AD 変換器群で低周波のデジタル信号に変換され、パソコンに取り込まれる。この方式で当初問題となった室温処理装置間の信号の干渉は、周波数特性を選んだフィルタ群を用いることで防止できた。その結果、低周波-マイクロ波間の周波数変換での、隣接する基準周波数の間隔を減少させ、1本の読出線上に多重化する画素数を増大できることを、世界で初めて明らかにした。さらに、この方式の試作として、1台の極低温冷却装置に実装された極低温回路、二台の室温信号処理装置、これらの間を接続する配線から成る、最も基本的な試験装置を製作し、正常動作することを確認するとともに、読出回路として重要な、雑音や画素間クロストークの少なさが従来法に劣らないことを実証した。

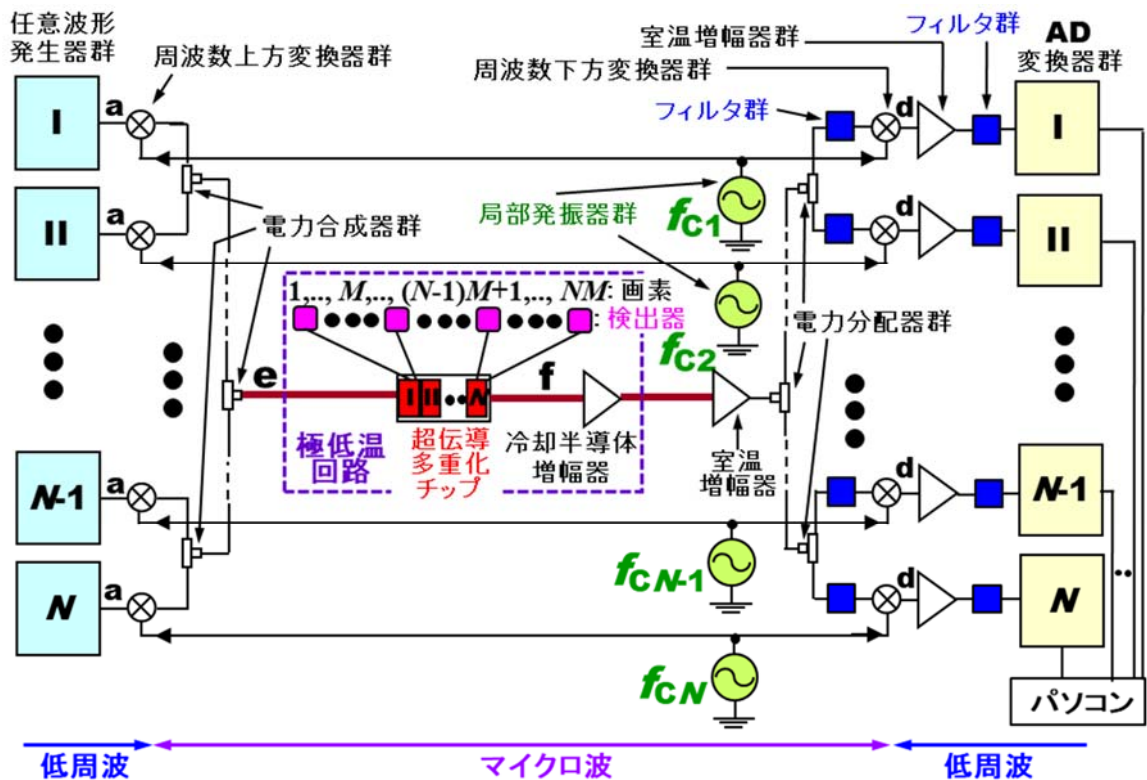


図 3 開発した新型のマイクロ波帯周波数多重読出回路の構成

従来型の多重化法では約 1000 個の画素信号のためには、同型の極低温冷凍機を 3 台以上必要(図 1: 点線 b と点線 d の比較)としたが、今回の多重化法を数百画素規模の超伝導検出器に適用することで、超伝導多重化チップ、汎用マイクロ波部品、市販の小型極低温冷凍機 1 台(三相 200 V、消費電力 7 kW、概略寸法: 巾 40 cm × 奥行 30 cm × 高さ 60 cm)で、1 本の読出線上に多重化(図 1: 実線 c と点線 d の比較)できる見通しが得られた。

図 4 に、超伝導検出器の特長を活かしつつ、その汎用化に貢献が期待される、今回の多重読出回路の研究の特徴と展開をまとめた。図 4(a)は、放射性物質が発する光子 1 個あたりのエネルギー(放射線源となる物質に固有の値)に対する、超伝導検出器(青)と半導体検出器(赤)の出力(検出光子数)を示す。図 4(b)には、放射線測定時の物質同定(組成、機能)の不確かさと計測時間の関係、図 4(c)には、今回の技術を適用することで可能となる、超伝導検出器用の極低温冷却装置の簡素化、図 4(d)には、今回の技術の適用で、計測時間短縮と小型・低消費電力化が両立できるようになる超伝導検出器の応用例を、それぞれ示した。今回開発した読出回路は、超伝導検出器の持つ優れた物質同定能力という特長(図 4(a))を活かしつつ、長年の課題であった、多画素化による計測時間短縮(図 4(b))と、計測器の小型化・低消費電力化・低廉化(図 4(c))の両立に資すると期待される。

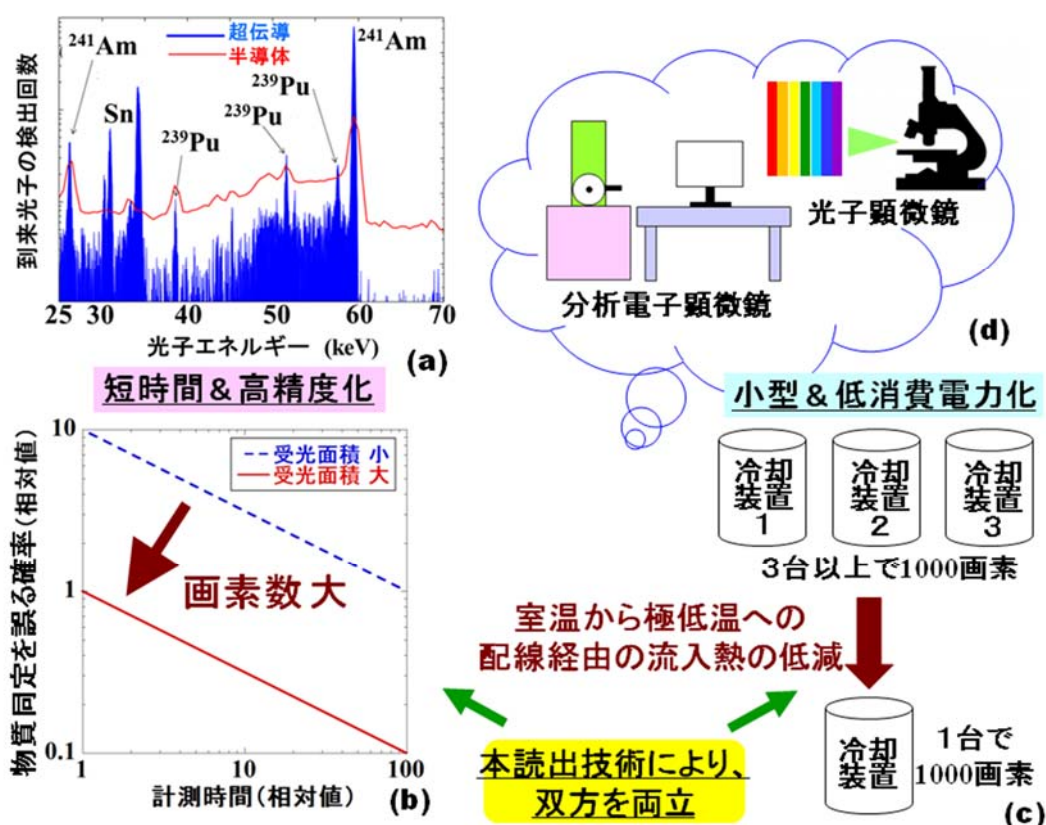


図 4 超伝導検出器の特長を活かしつつ、その汎用化に貢献する新規多重読出技術の展開

■ 今後の予定 ■

今回開発した読出回路を、実際に多画素超伝導検出器と組み合わせた動作実証を行う。例として、図4(d)に示す超伝導検出器を用いる光子顕微鏡(2017年4月5日産総研プレス発表)に適用できれば、撮像時間が1/100に短縮する可能性がある。

■ 本件問い合わせ先 ■

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

ナノエレクトロニクス研究部門 超伝導計測信号処理グループ
研究グループ付 神代 暁 (こうじろ さとし)

東京大学 大学院工学系研究科 原子力専攻

准教授 大野 雅史(おおの まさし)
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

【取材に関する窓口】

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 企画本部 報道室
〒305-8560 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第1
つくば本部・情報技術共同研究棟 8F

【用語の説明】

◆ 超伝導

固有の温度以下に冷却した特定種類の金属や酸化物が、直流電流に対する電気抵抗 = 0 と完全反磁性(磁力線を内部からはじき出す)の二つの性質を同時に示す物理現象。この性質を示す物質で作製した検出器を超伝導検出器と呼ぶ。

◆ 読出线

極低温下の超伝導検出器と室温信号処理装置の間を接続する配線。超伝導検出器の出力信号を室温信号処理装置で読出すための配線。

◆ 分析電子顕微鏡

電子顕微鏡は、試料に電子線を照射し、透過や反射する電子線の検知により、試料の微細構造を観測する装置。一方、物質に電子線を照射すると、物質を構成する元素に固有のエネルギーを持つ X 線が発生する。分析電子顕微鏡は、この現象を利用し、物質の構造だけでなく、組成(何の元素から構成されるか)を調べることができる。

◆ 光子顕微鏡

紫外光、可視光、あるいは赤外光の強度を弱めた極限である、単一光子の持つエネルギーを計測できる性能を持ち、レーザなどの外部光を試料に照射することなく、試料からの自然発光用の検出器を付属することにより、(分析電子顕微鏡が X 線領域の分光器であったのと同様に)光領域の分光器として機能する顕微鏡。

◆ ミリ波

波長 10 mm から 1 mm、周波数 30 GHz(G:ギガ、10 の 9 乗)以上 300 GHz 以下の電磁波の呼称。

◆ X 線・ガンマ線

波長 10 nm 以下、周波数 3×10^{16} Hz 以上の電磁波の呼称。

◆ 半導体

金属のように電流を流しやすい導体と、流さない絶縁体との間の性質を示す物質。半導体で作製した検出器を半導体検出器と呼ぶ。

◆ 脳磁計

視覚や聴覚などが興奮すると、電気を帯びたイオンが脳の神経内に分泌され、これに伴い微弱な電気信号(脳波)や磁気信号(脳磁界)が発生する。脳磁界検出装置を脳磁計と呼び、電気信号検出に比べ、電極を皮膚に付けることなく非侵襲で測定できるとともに、体の奥の興奮伝搬経路の解明に優れる特長を持つ。

◆ 心磁計

脳と同様、心臓の鼓動に伴う心筋の興奮伝搬は、電気信号や磁気信号として検出でき、前者を心電計(その結果を心電図)、後者を心磁計と呼ぶ。後者は前者に比べ、非接触性、非侵襲性、興奮伝搬経路の解明に優れている。

◆ 検出効率

電磁波(光)の強度を弱めた極限は、光子 1 個である。入射光子の位置は、スポットサイズ(光が投影された時に明るくなる照射部の直径)内ではばらつきを持つので、検出器の受光面がスポットサイズより広ければ、全ての到来光子が検出器に入射し出力を生じるが、逆に狭ければ、到来光子の一部しか出力を生み出さない。この時、出力信号強度を到来光子数(あるいは電磁波の振幅強度)で除した物理量を検出効率と言う。

◆ 少数画素を走査しながらの撮像(イメージング)

市販のカメラやビデオ撮影機には数多くの画素が備わっており、1ショットで被写体を撮像できる。一方、少数画素しか備えていないシステムでは、被写体の一部分しか一度に撮像できないので、撮像箇所を次々と変えながら得た複数の部分画像をつなぎ合わせて、被写体全体の像を取得する必要がある。また、複数ショットの合間毎に、被写体と検出器との間の位置合わせおよびピント合わせの必要が生じる。このため、多数画素による撮像に比べて、手間と撮像時間が余計にかかる。

◆ 周波数多重読出回路

検出器出力の強度に従い、信号の周波数を画素毎に変えた上で、これらを 1 本の読出線上の信号として束ねて伝送するとともに、受信側で各画素信号を分離する機能を持つ電子回路(図 2、3)。特に、マイクロ波の周波数帯で信号を束ねる場合には、マイクロ波帯周波数多重読出回路と言う。極低温回路と室温信号処理装置から構成される。極低温回路は、検出器、超伝導多重化チップ、冷却半導体増幅器から成る。

◆ マイクロ波

広義には、波長 1 m から 0.1 mm、周波数 0.3 GHz から 3000 GHz の電磁波の総称だが、厳密な定義のある用語ではない。本稿では、高精度かつ汎用の電気計測器や市販部品が豊富な、波長 100 mm から 10 mm、周波数 3 GHz から 30 GHz の狭義的範囲に用いることとする。

◆ 任意波形発生器

周波数の異なる複数の正弦波信号に重みをかけ足し合わせるにより、任意の周波数と波形を持つ交流電圧信号を生成する電気計測器。

◆ 周波数上方変換器

局部発振器の発振周波数(周波数 f_0)を基準に、信号の周波数 f_s を f_s+f_0 に増大する電子素子。本研究では、 f_s を汎用の任意波形発生器の利用できる約 1 GHz 以下の低周波域に、 f_s+f_0 をマイクロ波帯に設定した。

◆ 変調

基本信号(搬送波という)の振幅、周波数、または位相を、別の電気信号(電気通信の場合には、送りたい音声や映像)の強度に従って変化させること。

◆ 周波数下方変換器

局部発振器の発振周波数(周波数 f_0)を基準に、信号の周波数 f_s+f_0 を、 f_s に低減する電子素子。すなわち、周波数上方変換を元に戻す役割を担う。

◆ AD 変換器

アナログ信号をデジタル信号に変換する電子計測器。

◆ 画素間クロストーク

信号が入射しない画素の出力は本来 0 である。しかし、実際には、他の画素からの干渉を受け、わずかながら出力が生じる。この時の、他の画素からの干渉の強さの指標をいう。