サイエンスよみもの

短時間 & 高エネルギー分解能計測装置の小型化を目指して 多画素超伝導検出器のための多重読出回路

産業技術総合研究所 神代 暁

材料の蛍光 X 線分析や放射性物質の遠隔・非破壊・短時間分析に適したエネルギー分散分光装置に備えられた半導体検出器を、桁違いに優れたエネルギー分解能を持つ超伝導検出器で置き換えると、元素・同位体に対する識別能力の飛躍が期待される反面、小受光面積・小計数率に起因する計測時間増大が懸念される。多画素化による懸念克服は、超伝導検出器が備えられた極低温下と信号処理装置のある室温との間の配線数を増やし、これが、極低温への流入熱増大と分光器の体積・消費電力・価格を支配する極低温冷凍機の過負荷をもたらす。このジレンマ緩和のため、極低温下で、1本の読出線上に複数画素の出力を束ねる超伝導多重読出回路が研究されている。本稿では、多重読出回路に関する世界潮流を概説し、産総研の研究を紹介する。

KEYWORDS: *Microwave Multiplexer, Frequency-Domain Multiplexing, Superconducting Quantum Interference Device (SQUID), Superconducting Detectors, Transition Edge Sensor (TES), Metallic Magnetic Calorimeter (MMC)*

I. はじめに

エネルギー分解能の高い放射線検出器によるエネルギー分散分光(EDX)は、材料評価や核燃料検査に革新をもたらす。まず、電子線照射により試料の微細構造を観察する電子顕微鏡に、電子線励起蛍光 X 線検出器を装着すれば、構造に加え組成分析も可能とする「分析電子顕微鏡」を実現できる。従来の半導体 EDX 検出器では、エネルギー分解能 ΔE が波長分散分光(WDX)に桁以上劣る¹⁾。一方、EDX は、WDX の宿命であるスリットと分光結晶角度による波長掃引が不要なため、入射光利用効率が高く、計測時間が短い¹⁾。シリコン(Si)検出器($\Delta E=120\text{eV}@E\approx 6\text{keV}$)に比べエネルギー分解能が1桁以上優れた超伝導検出器を備えた EDX^{2, 3)}は、WDX に対し、同程度の ΔE と短時間計測の特徴を併せ持つ。これ一台で、多数試料のスクリーニング検査用 EDX と、少数試料の精密分析用 WDX の併用という呪縛からの脱却が期待される。次に、原子力発電所での核燃料管理

には、ごく一部抽出したサンプルを破壊・化学分析し、元素比や同位体組成比を求めている。この手法は高精度な反面、分析時間が長く、作業途上での事故発生の懸念を払拭できない。これに対し、核燃料が発する放射線から元素比・同位体組成比を非破壊検出できれば、分析時間短縮、作業事故の回避、全数検査への道が拓かれる。 $\Delta E\approx 500\text{eV}@E\approx 100\text{keV}$ のゲルマニウム(Ge)検出器⁴⁾による検査が検討されているが、 $\Delta E\approx 50\text{eV}$ の超伝導検出器⁵⁾で置換えることにより、元素・同位体識別能を介した分析精度向上⁶⁾が期待される。

このように ΔE に優れ EDX の飛躍的精度向上を期待できる超伝導検出器であるが、半導体検出器に比べ受光面積が2-3桁小さく、信頼できる統計量にまで光子計数を稼ぐには、長い計測時間を要する。体積を大きくすると超伝導検出器の ΔE は悪くなるので、単画素の受光面積を抑えつつ多画素化により計数率増大を狙う。この時、多画素化に伴い本数が増大する超伝導検出器-室温信号処理回路間の配線は、室温から極低温への流入熱を増大し、分光器の体積・消費電力・価格を支配する極低温冷凍機の強化を必要とする。この問題解決のため、極低温下で、複数画素出力を1本の読出線に束ねる多重読出回路(Multiplexer; MUX)の研究開発が盛んである。

Toward Volume-Reduction of High-Resolving Spectrometers with Short Measurement Time; Superconducting Multiplexers for Superconducting Detector Array : Satoshi Kohjiro.

(2018年3月20日受理)

本稿では、MUX 研究の世界潮流に触れた後で、超伝導転移端検出器(TES)読出を図る私達の研究を紹介する。

II. マイクロ波帯多重読出法(MW-Mux)

1. 各種多重読出法とその比較

MUX としては、時間多重(Time Division Multiplexing; TDM)、コード多重(Code Division Multiplexing; CDM)、周波数多重(Frequency Division Multiplexing; FDM)、マイクロ波帯周波数多重(Microwave Multiplexing; MW-Mux)の4通りが提案、研究されて来た⁷⁾。TDM は技術が最も成熟した MUX であり、X 線分光用 256 画素 TES-TDM システムが供給されている。一方、1 画素に着目すると、信号検出時間が1系統の読出線あたりの多重化画素数 U に反比例することに伴い、信号対雑音比(SNR)が $\sqrt{U}$ に反比例して悪くなる。 $U=32$ から $U=40$ への増大により TES エネルギー分解能 ΔE の 2.6eV ⁸⁾ から 2.8eV への劣化が報告されており、TDM における U は、この辺りが上限と見込まれる。CDM の SNR は原理的に U に独立であり、 $U=32$ の動作実証時の平均値 $\Delta E=2.8\text{eV}@E=5.9\text{keV}$ ⁹⁾ から、この原理を基に、 $U=40$ へも ΔE の劣化なしに充分対応できるとともに、読出回路雑音の $1/2 \times \sqrt{U}$ 倍の増大に目をつむれば $U=92$ も可能と見積もられた⁹⁾。TDM は読取対象画素を、CDM は各画素の極性を時間的に切り替えるため、 U 増大には、両者とも過渡応答時間の小さなスイッチの開発が必要となる。FDM はスイッチを使わず、画素毎に独自の共振周波数で信号を変調し、 U 個の周波数を持つ信号群を1本の読出線に多重化するため、TDM や CDM の制約は被らない。一方、TDM や CDM においては、TES バイアスが直流で良いのに対し、FDM は交流駆動を要する。これが TES 動作の安定性を損なっているとの報告¹⁰⁾があり、 $\Delta E < 3\text{eV}@E=5.9\text{keV}$ での同時読出実証画素数は、TDM や CDM に比べ遥かに小さい2画素¹¹⁾に留まっている。

2. MW-Mux の原理・特徴

スイッチを用いず、直流バイアスの TES と TES より発熱の小さな読出回路素子を使うとともに、他の3方法に比べ潜在読出帯域が2~3桁大きい多重化法が MW-Mux^{12~14)}であり、最近、研究者人口が増えて来た。図1に MW-Mux の構成を示す。画素毎に共振周波数 f_R の異なる共振器の一端を、超伝導検出器と1:1に接続された超伝導量子干渉素子(SQUID)と呼ばれる非線形インダクタンス L_S で終端し、他端を結合キャパシタ経由で1本のマイクロ波読出線に結合した構造をとる。 L_S は、入射光子のエネルギーに比例した超伝導検出器からの出力電流値に依存し変化する。これが、共振器の終端条件を介して、 f_R 値および $f \approx f_R$ におけるマイクロ波透過率(図1(a), (b)の Port(端子)1-2 間の周波数依存性 $S_{21}(f)$ を変化させる。画素毎に f_R が異なっている

図1 MW-Mux の構成 (a)等価回路 (b)産総研製チップ (c)マイクロ波透過率 vs. 周波数 (d)SQUID 磁束による周期変化

ので、全画素の $S_{21}(f)$ 情報が周波数軸上に並ぶ(図1(c))。この時、1本の読出線上への原理的な多重化画素数 U は、次式で表される。

$$U = B / (k f_S) \quad (1)$$

但し、 $\kappa \equiv \Delta f_R / f_S \approx 10$ (クロストーク $\leq -30\text{dB}$ を得るに要する κ 値)、 Δf_R は隣接共振周波数間隔、 f_S は1画素あたりの信号周波数帯域、 B は、本質的にはチップ後段に配置した極低温高電子移動度トランジスタ (High-Electron-Mobility Transistor; HEMT) 増幅器で決まる読出周波数帯域である。TDM, CDM, FDM の3方式では、MW-Mux とは異なり、SQUID を入力電流から出力電圧への変換器および極低温での微弱信号を室温で扱うに適した大きさの信号に増幅するための電圧増幅器として用いた。このため、消費電力(発熱が冷凍機の熱負荷となる)は、SQUID が TES を遥かに上回った。また、電圧増幅器用 SQUID より入力側で多重化するため、(1)式の B は、SQUID 電圧増幅器の帯域 ($\approx 10\text{MHz}$) の制約を受けた。これに対し、MW-Mux では、SQUID を TES 以下の消費電力に抑えた零電圧バイアスで用い極低温冷却系の熱負荷を極力抑えている。また、SQUID 後段の広帯域 HEMT で多重化することで、SQUID より2~3桁大きな $B \approx 4\text{GHz}$ が期待できる。以上2点により、MW-Mux は、 U 増大に関し他の3方式に比べ有利と言える。

3. 他機関での MW-Mux 研究

米国標準研究所 (National Institute of Standards & Technology; NIST) の Mates らは、ガンマ線検出用 128 画素 TES を、入出力わずか1本ずつのマイクロ波同軸線で極低温から室温に読出すシステムを開発し、89 画素の平均で $\Delta E = 55\text{eV}@E = 97\text{keV}$ のエネルギー分解能を得た¹⁵⁾。この分解能は、5年前に NIST が TDM 法により 32 画素 / 系統 $\times$ 室温処理回路 8 系統 = 256 画素 TES

をベースとするガンマ線検出システムを開発し、その中の 236 画素の平均値として得た値 $53\text{eV}^{(5)}$ に遜色ない。従来の TDM システムにおける読出回路の極低温-室温間の配線数は、本 MW-Mux システムと同等の 128 画素規模への換算値が約 60 本であったのに対し、MW-Mux では、マイクロ波入力・出力用の 2 本の同軸ケーブルと変調磁束(各画素共通)印加線 2 本を要するのみである。これにより、TES 分光器の体積・消費電力・価格を支配する極低温冷凍機を強化せず画素数を増大できる MW-Mux の優位性を示すことに成功した。

NIST と共同で、ガンマ線以外の検出に資する多画素 TES 読出用 MW-Mux の研究に、複数の機関が着手している。例えば、天文観測用 X 線 TES(米国航空宇宙局ゴダード研究所; NASA-GSFC), 基礎物理用 X 線 TES(イタリアミラノ大学), 放射光利用材料分析用 X 線 TES(米国 SLAC 国立加速器研究所), 宇宙背景放射観測用サブミリ波帯 TES ボロメータ, ミリ波天文用 TES ボロメータ(米国ペンシルバニア大学)等が挙げられる。中でも、NASA-GSFC は、5 画素読出の平均値 $\Delta E = 3.0\text{eV}@5.9\text{keV}$, 28 画素読出の平均値 $\Delta E = 3.4\text{eV}@5.9\text{keV}$ の優れたエネルギー分解能を得た¹⁶⁾。特に前者は、雑音計測からの予測値や CDM 読出時の値 $\Delta E = 2.8\text{eV}$ に殆ど遜色がない。

ドイツ Heidelberg 大学では、金属磁気カロリメータ(Metallic Magnetic Calorimeter; MMC)読出用の MW-Mux を開発している。当面 64 画素読出を目標としているようであるが、論文¹⁷⁾には 3 画素の実験データが掲載されているのみである。最高性能の画素では、MW-Mux で読出した MMC の $\Delta E = 53\text{eV}@5.9\text{keV}$ (光子入射なし $\Delta E = 42\text{eV}$), 白色雑音域での SQUID 入力磁束換算読出雑音 $0.9\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ (但し, $\Phi_0 = h/(2e)$ は磁束量子, h はプランク定数, e は単位電荷)を得た¹⁷⁾。また、MW-Mux の実験的な振舞いを説明するため理論的な検討がよくなされている。例えば、共振 Q 値が、SQUID への印加磁束に対する依存性を持つという、他機関の MW-Mux では見られない現象を、SQUID 内のジョセフソン接合素子の電流-電圧特性上のサブギャッ

プリーク電流の多さに起因すると説明付け、実験結果とモデル計算との良い一致を得た¹⁷⁾。

Ⅲ. 産総研での MW-Mux 研究

海外でのこのような取り組みに対し、日本では、産業技術総合研究所(産総研)が唯一、東京大学大学院工学系研究科原子力工学専攻(東大), 原子力研究開発機構, 宇宙航空研究開発機構(JAXA), 首都大と共同で MW-Mux 研究を進めて来た。本章では代表的課題の概要を述べる。

1. 読出回路単体

(1) 共振器-SQUID 直接結合による設計簡素化

冷却半導体増幅器の帯域 4-8GHz の範囲で分布する共振周波数 f_R に対し、SQUID への入力磁束による f_R の最大変化幅 δf_R (図 1(d)) を一定値としたい。そのためには、共振器-SQUID 結合度を f_R に依存して画素毎に変化させる必要がある¹⁸⁾。他機関では、共振器-SQUID 間を相互インダクタンス M_{MW} を介した磁気結合^{13, 14, 17)} (図 2(a)) としている。一方、TES からの信号入力線と SQUID 間には、 M_{MW} よりも大きな相互インダクタンス M を介した磁気結合を要する。 $M_{MW} \ll M$ 実現のため、SQUID 近傍に TES との磁気結合用コイルを巻き、その外側に共振器との磁気結合コイルを這わせるデバイス構造¹⁴⁾ を採る。この時、 M_{MW} 値は、共振器-SQUID 間結合コイルのみならず、TES-SQUID 間結合コイルの形状や寸法にも依存する。このため、画素数増大時の設計が複雑になる。これに対し、産総研では、SQUID を構成するリング状超伝導電極の左右分枝の非対称度 a のみで共振器-SQUID 間結合強度を決定できる直接結合法¹⁹⁾ を採用した。直接結合法(図 2(b), (c))では、同一の構造・形状・寸法の SQUID リングにより、 f_R にあわせ広範囲の a 値設定が可能ゆえ、画素数増大時の設計が磁気結合法に比べ緩和される¹⁸⁾。

(2) 高い応答性を得るための共振器の材料

MW-Mux の感度向上と読出雑音低減には、急峻な周波数特性を持つ共振器が必要とされる。共振器のマイク

図2 共振器と SQUID との二結合方式((a)磁気結合同型 (b)直接結合同型)および(c)直接結合同型採用のチップ(図1(a)で MUX Chip と記述された破線長方形部)中心部。SQUID 電極の接地穴“GND(LL to GP)”の位置(線路長 l_{JJ})による非対称パラメータ a 調整が可能。

図3 4種類の材料の共振器の性能指数である無負荷 Q_U と、共振器内マイクロ波電力 P_{Res} との関係(温度 0.1K)

口波に対する損失の逆数として定義される無負荷 Q 値 Q_U が大きい程、一般的に周波数特性が急峻となる。このため、低マイクロ波損失の電極・基板材料の選択が重要になる。他機関の MW-Mux では、Si 基板上のニオブ (Nb) のみを材料としているが、産総研では、基板材料 2 通り (Si, サファイア (Al_2O_3)) $\times$ 電極材料 2 通り (Nb, 窒化ニオブ (NbN)) の 4 種材料の共振器を試作し、 Q_U を比較した²⁰⁾。図 3 は、共振器に蓄積されるマイクロ波電力 P_{Res} と Q_U の関係である。図 3 より、4 種類いずれも P_{Res} に従い Q_U は増大し、共振器以外の損失の逆数 Q_C より 1 桁大であった。特に、SQUID が最低雑音動作する $-40 \leq P_{\text{Res}} \text{ (dBm)} \leq -35$ の領域では、Si より Al_2O_3 、Nb より NbN が、高い Q_U 値を得た。

(3) 画素間クロストーク & 直線性誤差の低減

画素数 U 増大に伴い、画素信号間の干渉が問題となり、画素間クロストーク低減の重要性が増す。また、高エネルギー分解能の分光計実現のためには、入射光子エネルギーと読出回路出力との間に、高い線形性と広いダイナミックレンジが求められる。私達は、入出力特性の線形からのずれ(直線性誤差)が画素間クロストークに比例することを世界で初めて、およびクロストーク低減に効果あるチップ上の共振器群配列方針を見出した²¹⁾。例えば、チップ上で 0.5mm 離れた隣接画素間の共振周波数間隔 Δf_R の 20MHz から 80MHz への増大は、クロストーク量を約 1/15 に低減し、直線性誤差を $E/\Delta E \approx 10^3$ の分光に適用可能な 2×10^{-3} 程度に抑えた²¹⁾。

2. 超伝導転移端検出器 (TES) との協調動作

(1) 読出性能評価

共同研究を行う東大で開発した硬 X 線・ γ 線検出用 TES^{22, 23)} への ^{57}Co 線源からの照射実験において、本 MW-Mux を信号読出に用いた。立上時間 $\approx 0.1\text{ms}$ のパルスを忠実に読出せており、読出回路が本目的に十分な高速応答性を持つことが示された。また、光子エネルギー分布の解析(図 4)により、 $\Delta E = 101\text{eV}@122\text{keV}$ を得た²⁴⁾。ここで、零バイアス TES(零雑音)の雑音スペ

図4 産総研製 MW-Mux で読出した ^{57}Co 照射下の東大製 TES 出力と、理論曲線とのフィッティングによる ΔE 算出

クトルから見積もった読出回路の ΔE への寄与は約 61eV であった。TES や冷凍機振動等、読出回路以外に起因する雑音の寄与は $\sqrt{(101^2 - 61^2)} = 80\text{eV}$ となる。すなわち、現状の読出回路は、分光器の総合的 ΔE を $101 - 80 = 21\text{eV}$ 程劣化させる程度の雑音源となっている。

(2) 更なる低雑音化に向けて

分光器の本質的 ΔE がより低いシステムや、更に低雑音の TES 読出に供するためには、読出雑音の低減が求められる。白色雑音域(私達の場合、約 100Hz 以上の周波数帯)の読出雑音は、冷却 HEMT 増幅器雑音に支配され²⁵⁾、SQUID 入力磁束換算値では NIST に劣らない $1.0\text{--}1.5\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ を得ているが、TES 電流換算値は $35\text{--}52\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ と NIST の報告値 17pA の 2~3 倍である。理由は、TES-SQUID 間の結合度(図 2(b)の M 値)が NIST の 1/3 以下のためである。理論上、 M の 2 倍化は問題なく実現可能と考えており、更なる M 増大に基づく電流換算雑音の低減可能性を検証する計画である。これにより、読出雑音の寄与を $\Delta E \leq 30\text{eV}$ に低減できる見込みである。

3. 大規模多重化へ向けて

(1) 式より、 U 増大には B 増大を要する。本来、極低温 HEMT 増幅器が B を制約するが、現状は、図 1(a)に示すマイクロ波出力の接続先である室温信号処理系内の Analog-Digital 変換器 (ADC) の帯域 ($E/\Delta E \approx 10^3$ の分光に必要な約 14bit の場合、約 1GHz) に制約される。また、帯域以外にも、 U 増大に伴い重畳される信号電力が、ADC の雑音寄与度を高めるとともに、増幅器や周波数変換器の非線形性を介した入出力特性の歪や広い周波数帯にわたる雑音(スプリアス)をもたらす。NIST 等他機関では、 U 増大に耐え得る広帯域・大電力・低スプリアスの室温処理回路開発を目指している。私達は、1 個の室温処理回路に画素数 U の処理を任せるのではなく、 U より小さな画素数 M を扱う帯域 1GHz 以下の汎用室温信号処理回路 N システムを並列化し、システム毎にマイ

図5 極低温統一配線&室温分散処理型の概要 (a) N 系統室温処理回路の周波数割当 (b) 情報量や信号電力を水量に例えた従来型(左)と本提案(右)の違い

クロ波帯への周波数変換時の基準周波数を個別に定めることにより、図5に示すように、周波数軸上の隣接領域に各室温回路が扱う M 画素の読出信号情報を当てはめ、それらの合計により $U (= M \times N)$ 画素の信号処理を行う極低温統一配線 & 室温分散処理型 MW-Mux を提案²⁶⁾した。そして、 $N=2$, $M=3$ の場合の基本動作を実証するとともに、従来型 MW-Mux に比べ遜色ない低雑音性と低い画素間クロストークが得られることを示した²⁶⁾。

IV. まとめ

半導体検出器に比べ X 線・ガンマ線の分光能力が桁違いに高い超伝導検出器の計測時間短縮と分光器の小型化・低消費電力化・低廉化とを両立するための鍵となる MW-Mux の世界的研究動向と日本の研究開発を紹介した。中でも、汎用部品の基で、1 本の読出線あたりの多重化画素数を、原理的な制約値にまで増大できる極低温統一配線 & 室温分散処理型 MW-Mux の基本動作実証と性能評価を行い、本方式の有効性を示した。今後は、本方式により数十画素規模から始め、数百画素にまで動作実証を行う予定である。

付記

本稿は、以下の方々との共同研究に基づく。平山文紀、山森弘毅、佐藤昭、永沢秀一、福田大治、佐藤泰、日高睦夫(以上、産総研)、入松川知也、大野雅史、高橋浩之(以上、東大)、中島裕貴、山崎典子、満田和久(以上、JAXA)、高崎浩司(原子力研究開発機構)、山田真也(首都大)。チップは、産総研の共用施設 CRAVITY(Clean

Room for Analogue digital superconductivity)²⁷⁾ で作製された。本研究は、科研費補助金 JP15H02251 (2015～17 年度)、23360182 (2011～13 年度)、および文科省原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ(2014～16 年度)の支援を受けた。

— 参考資料 —

- 1) 合志陽一, 佐藤公隆編, エネルギー分散型 X 線分析 半導体検出器の使い方, 日本分光学会, 測定法シリーズ 18, 学会出版センター(1989).
- 2) D. A. Wollman et al., J. Microsc. 188, 196(1997).
- 3) www.starcryo.com.
- 4) C. A. Klein, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-15, 214(1968).
- 5) D. A. Bennet et al., Rev. Sci. Instrum., 83, 093113(2012).
- 6) A. S. Hoover et al., Nucl. Instrum. & Meth. Phys. Research A 652, 302(2011).
- 7) J. N. Ullom, D. A. Bennett, Supercond. Sci. Technol., 28, 084003(2015).
- 8) W. B. Doriese et al., J. Low Temp. Phys., 184, 389-395(2016).
- 9) K. M. Morgan et al., Appl. Phys. Lett., 109, 112604(2016).
- 10) L. Gottardi et al., Appl. Phys. Lett., 105, 162605(2014).
- 11) H. Akamatsu et al., J. Low Temp. Phys., 184, 436-442(2016).
- 12) K. D. Irwin, K. W. Lehnert, Appl. Phys. Lett., 85, 2107(2004).
- 13) J. A. B. Mates et al., Appl. Phys. Lett., 92, 23514(2008).
- 14) J. A. B. Mates, Ph. D thesis, Univ. Colorado(2011).
- 15) J. A. B. Mates et al., Appl. Phys. Lett., 111, 062601(2017).
- 16) W. Yoon et al., J. Low Temp. Phys., in press, <https://doi.org/10.1007/s10909-018-1917-0> (2018).
- 17) S. Kempf, et al., Supercond. Sci. Technol. 30, 065002(2017).
- 18) Y. Nakshima, et al., IEICE Elect. Exp., 14, 20170271(2017).
- 19) F. Hirayama et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 2500405(2013).
- 20) T. Irimatsugawa et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 27, 2500305(2017).
- 21) F. Hirayama et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 27, 2500205(2017).
- 22) S. Hatakeyama, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 25, 2101603(2015).
- 23) M. Ohno, IEICE Trans. Electron, E100-C, 283(2017).
- 24) 入松川知也, 東京大学大学院工学系研究科博士論文(2018).
- 25) S. Kohjiro et al., J. Appl. Phys., 115, 223902(2014).
- 26) S. Kohjiro, F. Hirayama, Supercond. Sci. Technol., 31, 035005(2018).
- 27) <https://unit.aist.go.jp/neri/cravity/ja/index.html>

著者紹介

神代 暁 (こうじろ・さとし)

産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門
(専門分野/関心分野)超伝導エレクトロニクス