

(3) 超伝導遷移端検出器のマイクロ波帯多重化読出回路

(3) Microwave Multiplexers for Readout of Transition Edge Sensors

*神代 暁

産業技術総合研究所

1. はじめに

超伝導検出器の低雑音性は、ミリ波～ガンマ線の9桁に渡る波長域において、半導体等、他の検出器を凌駕する。一方、室温動作検出器に比べ、小受光面積やイメージング機能に乏しい欠点を持つ。検出器多画素化による受光面積増大（高計数率化）やイメージング時間短縮を図る際、画素数増大に伴う、極低温-室温間の信号配線経由の極低温への熱流入は、超伝導検出器システムの体積・消費電力・価格を支配する極低温冷凍機の巨大化・複雑化をもたらし、普及の障害となる。この問題の解が、極低温下で複数画素の出力信号を多重化し、1本の読出線で室温に導く多重回路(MUX)である。

MUX としては、時間多重(TDM)、コード多重(CDM)、周波数多重(FDM)、マイクロ波周波数多重(MW-Mux)の4通が提案、研究されて来た¹⁾。本稿では、4種の中で最も広い読出帯域を持ち、多重化数を期待できるMW-Muxに関する産業技術総合研究所（産総研）の研究を紹介する。

2. マイクロ波周波数多重読出(MW-Mux)

MW-Mux は、入射光子に伴うクーパ対破壊による超伝導インダクタンス変化を検出原理とする Kinetic Inductance Detector (KID)²⁾と、Transition Edge Sensor (TES)¹⁾や Metallic Magnetic Calorimeter (MMC)³⁾等、半導体チャージアンプでは不適当な低い出力抵抗を持つ検出器や超伝導量子ビット⁴⁾の出力電流を読む Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)のインダクタンス変化に基づく方式に大別される。後者は、2008年に米国標準研究所(NIST)のMatesらにより発表⁵⁾された。後者は、画素

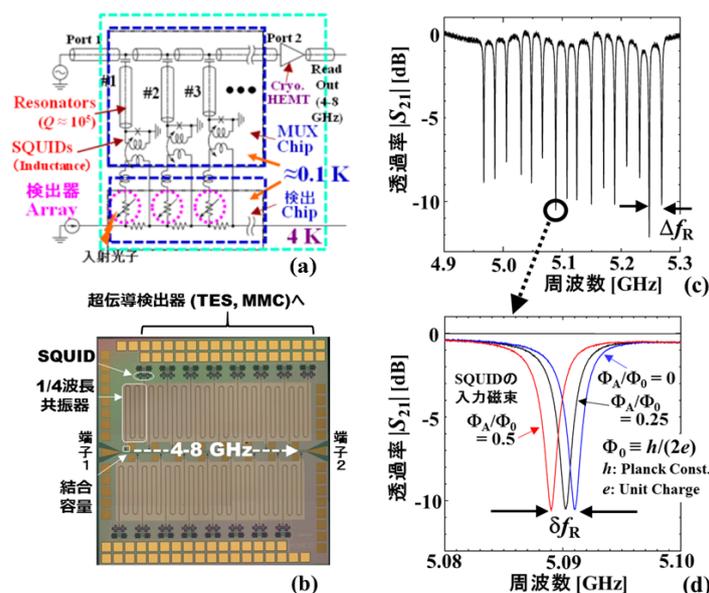


図 1. MW-Mux (a) 極低温部 (b)産総研製チップ (c) マイクロ波透過率 vs. 周波数 (d) (c)の拡大

*Satoshi Kohjiro

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

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 SQUID (但し、従来と異なり、零電圧モードで用いる) 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 (図 1(a), (b)) をとる。読出電流による SQUID インダクタンス L_S の変化を、 f_R の変化として、各画素の情報を周波数軸上に並べ読み出す (図 1(c), (d))。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。

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

但し、 $\kappa = \Delta f_R / f_S \approx 10$ (クロストーク ≤ 30 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 (HEMT) 増幅器で決まる読出周波数帯域である。TDM, CDM, FDM の 3 方式が、電圧モードの SQUID で制約される $B (\approx 10$ MHz) を持つのに対し、MW-Mux では、広帯域 HEMT の特徴を活かした 2-3 桁もの B 増大が期待される。また、零電圧 SQUID と超伝導共振器の発熱は TES の消費電力以下ゆえに、MW-Mux では、超伝導デバイスに必須の極低温冷却系の熱負荷の抑制度が高い。NIST は、2013 年に 2 画素ガンマ線 TES の MW-Mux 多重読出において、TDM 読出に遜色ない 60-90 eV@ 100 keV のエネルギー分解能を得て⁶⁾、現在 512 画素システムの開発を進めている。一方、ドイツ Heidelberg 大は、MW-Mux を MMC の読出回路として、まずは 64 画素、将来的には 4000 画素以上への対応を目指した研究³⁾を行っている。また、検出器アレイのみならず、人工知能に繋がる超伝導量子アニーリング機械を開発・販売したカナダ D-Wave が、大容量超伝導量子ビットの情報を、室温に高速に読出す技術として研究⁴⁾している。

3. 産総研での MW-Mux 研究の概要

産総研は、NIST に次いで 2011 年に MW-Mux の研究に着手し、東大大学院工学系研究科および宇宙航空研究機構 (JAXA) と共同で、下記を特徴とする研究開発実績を持つ。

3-1. 非対称直接結合型 SQUID

極低温環境下に置く超伝導 MW-Mux チップ上の重要な要素素子は、超伝導薄膜共振器と TES 出力電流を効率良く受ける SQUID である。両者間の結合方式が、他機関では、相互インダクタンス M_{MW} を介した弱い磁気結合 (図 2(a)) であるのに対し、産総研では強い直接結合 (図 2(b))⁷⁾を採用した。前者は、結合パラメータの可変範囲が広いが、磁気結合用の共振器終端インダクタンス L_{MW} の不均一性による共振周波数設計値からのずれの増大が不可避⁸⁾である。後者は、パラメータの可変範囲が狭いが、共振周波数の設計値からのずれを低く抑えることができる⁸⁾。また、幅広い周波数帯に渡る f_R を持つ各画素間で ϕ_R (図 1(d)) を一定値に揃えるためには、磁気結合の場合 M_{MW} 、直接結合の場合 a を調整し、各 SQUID に割り当てる必要がある。 M_{MW} は超伝導リングから成る SQUID の周囲に巻くコイル長とターン数に依存する。したが

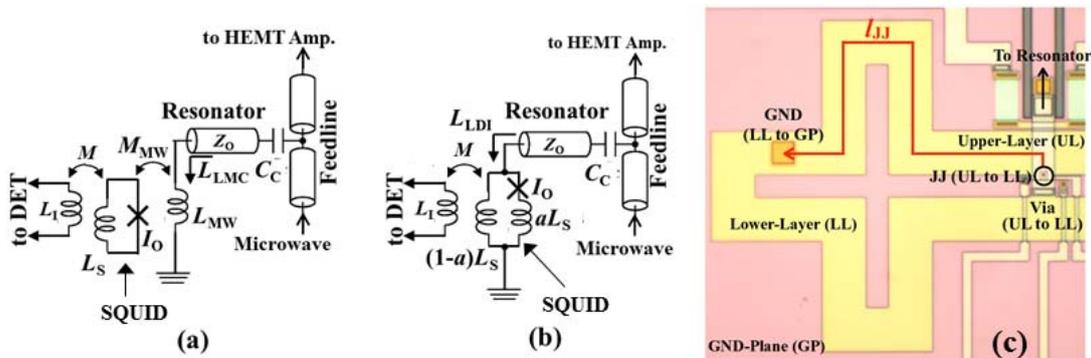


図 2. 共振器と SQUID との結合方式 ((a) 磁気結合型 (b) 直接結合型) および (c) 直接結合型 SQUID リングの写真。接地ビア GND(LL to GP)の位置による非対称パラメータ a 調整が可能。

って、 M_{MW} の異なる各画素の SQUID は一般的に構造・形状・寸法が異なる。つまり、磁気結合型では、画素数増大に伴う M_{MW} の制御性・再現性確保の困難性が懸念される。一方、 a の調整は、同一構造・形状・寸法の SQUID リングに設けた接地ビアの位置変更のみで実現できる (図 2(c))⁸⁾ため、画素数増大時の精度を確保しやすいと期待される。

3-2. 多様な材料による共振器

チップのマイクロ波透過率 $|S_{21}|$ のディップ深さ (図 1(c), (d)) と、共振器の無負荷 Q 値 Q_U 、結合 Q 値 Q_C との間には、 $1/|S_{21min}| = 1 + Q_U/Q_C$ の関係が成り立つ。深いディップをもたらす $Q_U \gg Q_C$ なる共振器が、系の雑音の支配要因である HEMT 雑音の寄与低減に資する。MW-Mux チップを作製している他機関 (米国 NIST、ドイツ Heidelberg 大) は、Si 基板上的 Nb 電極の共振器に限定しているのに対し、産総研は、基板 2 種 (Si or Al_2O_3)、電極 2 種 (Nb or NbN) の材料か成る共振器を試作し、特性を比較した。4 K では超伝導転移温度 T_c の高い NbN が Nb に比べ高 Q_U 値を得て、雑音低減効果を実証⁹⁾した。0.1 K の Q_U 値の共振器内マイクロ波パワー P_{res} 依存性を図 3 に示す。4 種類とも、 P_{res} 増大にともない Q_U 値が増大¹⁰⁾した。私達の MW-Mux が雑音最小となる $-40 \leq P_{res} \leq -35$ dBm において、4 種の材料ともに、チップでの入力電流から出力周波数変化への変換効率が最大時の 90% 以上となる $Q_U \geq 10 Q_C$ を得た¹⁰⁾。1 画素あたりの入射信号周波数が 1 MHz の場合に必要となる $Q_C = 5 \times 10^3$ に対しては、 $Q_U \geq 10 Q_C = 5 \times 10^4$ を満足した。一方、より低い光子入射頻度だが、より U を増大したい応用、例えば、ガンマ線単一光子検出やミリ波・サブミリ波のボロメータ検出に対しては、 Q_C 増大により、より多くの画素の共振周波数を周波数軸上に密に詰める (Δf_R 低減) 必要がある。この時、HEMT 雑音の寄与を抑制する $Q_U \geq 10 Q_C$ の実現のため、Nb より Q_U 値の高い NbN 製共振器が望ましいと言える。

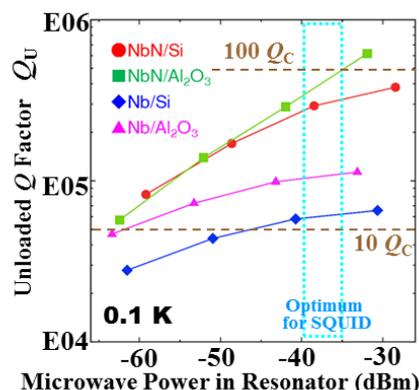


図 3. 4 種類の材料の共振器の「良さの指数」無負荷 Q 値と、共振器内マイクロ波電力との関係

3-3. 画素間クロストークと直線性誤差の低減手法

N 増大に伴い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 (世界初) こと、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¹¹⁾。図 4 にクロストーク量 (定義は文献¹¹⁾を参照) と空間的隣接画素間の共振周波数間隔 Δf_R の関係を示す。 $\Delta f_R = 20$ MHz のチップに対し、 $\Delta f_R = 80$ MHz のチップはクロストーク量が約 1/15 に低減し、エネルギー/エネルギー分解能 $\approx 10^3$ の分光に適用可能な 2×10^{-3} 程度を実現¹¹⁾した。

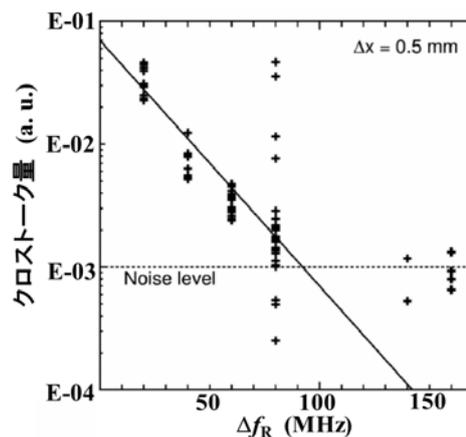


図 4. クロストーク量と 0.5 mm 離れた隣接画素間の共振周波数差の関係

3-4. 室温処理系に制約されない高 U 化を目指した二段型 MW-Mux

(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 (エネルギー/エネルギー分解能 $\approx 10^3$ の分光に必要な 14 bit 程度の場合、約 1 GHz) に制約される。NIST 等他機関で

は、 U 増大のため広帯域室温処理回路を開発中である。一方、1 GHz を超える広帯域 ADC や処理能力の高い Field Programmable Gate Array は、未だ開発途上にあり、これらを使いこなすためのソフトウェアや周辺技術が未整備であるとともに、単位体積あたりの電力消費が大きく、長時間使用には放熱措置を別途講じる必要がある。私達は、1 個の ADC 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 R を扱う帯域 1 GHz 以下の汎用 ADC ベースの室温信号処理モジュール N 個を並列化し、モジュール毎にマイ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モジュールが扱う R 画素の読出信号情報を当てはめ、それらの合計により $U (=R \times N)$ 画素の信号処理を行う二段型 MW-Mux を提案¹²⁾した。そして、 $N=2$, $R=3$ 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クロストークが得られることを示した¹³⁾。

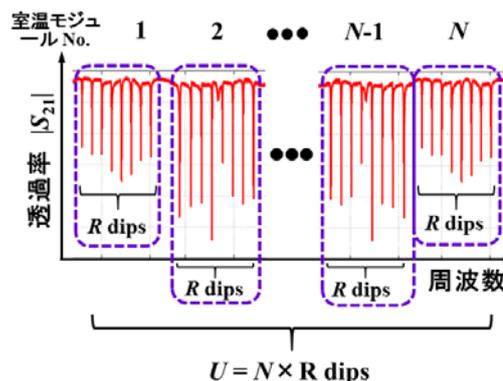


図 5. 周波数軸上に示す、二段型 MW-Mux における信号処理の室温モジュール間分担

4. まとめ

超伝導検出器の多画素化を支える多重読出技術として、他方式に比べ優れた広帯域性と低消費電力性を持つ MW-Mux に関する世界の研究動向と産総研の研究を概説した。以上の技術を基に、産総研では、要求される高速応答性を確保した上での 2 画素 X 線 TES の同時読出に成功した。現在、雑音低減と画素数増大に向けた研究展開の途上である。

謝 辞

共同研究者である平山文紀、山森弘毅、永沢秀一、佐藤 昭、福田大治、佐藤 泰、日高睦夫（産総研）、入松川知也（東大）、中島裕貴（JAXA）の各氏、及び、日頃ご議論頂く大野雅史、高橋浩之（東大工）、山崎典子、満田和久(JAXA)の諸先生方に感謝する。MW-Mux チップは、産総研の共同利用施設 Clean Room for Analogue Digital Superconductivity (CRAVITY)にて作製された。本研究は、学術振興会科学研究費補助金 JP15H02251、及び文科省原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ(2017年3月終了課題)の支援を受けた。

参考文献

- 1) J. N. Ullom and D. A. Bennet, *Supercond. Sci. Technol.*, **28** (2015) 84003.
- 2) J. Zmuidzinas, *Annu. Rev. Cond. Matt. Phys.*, **3** (2012), 169-214.
- 3) S. Kempf *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **30** (2017) 065002.
- 4) J. D. Whittaker *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **119** (2016) 014506.
- 5) J. A. B. Mates, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008) 023514.
- 6) O. Noroozian, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **103** (2013) 202602.
- 7) F. Hirayama, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **23** (2013) 2500405.
- 8) Y. Nakashima, *et al.*, *IEICE Electronics Express*, **14** (2017) 20170271.
- 9) S. Kohjiro, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **115** (2014) 223902.
- 10) T. Irimatsugawa *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27** (2017) 2500305.
- 11) F. Hirayama *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27** (2017) 2500205.
- 12) 神代他、特願 2015-148140, 特開 2017-028635.
- 13) S. Kohjiro and F. Hirayama, submitted.