2-4 単一磁束量子回路を用いた極低温信号処理システムの開発

2-4 Development of Cryogenic Signal Processor by Using Single Flux Quantum Circuits

宮嶋茂之

MIYAJIMA Shigeyuki

超伝導単一磁束量子 (SFQ) 回路は極低温環境下において動作する高速・低消費電力ディジタル 回路である。我々は SFQ ディジタル回路を超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD) の後段信号 処理に適用し、シングルピクセルの SSPD では実現不可能な大面積・高速な SSPD、あるいは光子 数識別や空間識別 (イメージング) が可能な SSPD の実現を目指した研究開発を進めている。また、 我々のプロジェクトでは、これまで SFQ 回路の超伝導電極として広く用いられてきた Nb に替わ り、超伝導転移温度が更に高い窒化ニオブ (NbN) を用いた集積回路作製プロセスについても研究 開発を進めている。これにより、Nb 集積回路では不可能な 10 K での動作や、20 mK という極低 温で動作する量子ビットの制御・読出し回路の高密度集積化が可能となる。本稿では、我々のこ れまでの研究活動を紹介するとともに、今後の研究の方向性について述べたい。

Superconducting single flux quantum (SFQ) circuits are high-speed and low-power digital circuits operating at a cryogenic environment. We have applied SFQ digital circuits to the post signal processor for superconducting nanowire single-photon detectors (SSPDs) to realize high-speed SSPD system with large detection area and/or SSPD system with photon-number or spatial resolution (imaging) that cannot be realized by single-pixel SSPD. Although SFQ circuits have been fabricated using niobium (Nb) as a superconducting electrode, we have developed fabrication process of SFQ circuits based on niobium nitride (NbN) with a higher critical temperature. The NbN integrated circuit enables the operation at 10 K that is never achievable by Nb and also dense integration of SFQ circuit operating at 20 mK for the control and readout of superconducting quantum bits. In this paper, we introduce our research activity so far and describe the future prospect of this technology.

1 まえがき

超伝導単一磁束量子(Single Flux Quantum: SFQ)回路は、特定の物質において電気抵抗がある温度(超伝導転移温度)以下でゼロになる超伝導現象を利用したディジタル回路である。100 GHz に達する超高速クロック、かつ1ゲート当たり1 µW を下回る超低消費電力で動作するディジタル回路を構成することが可能となる。SFQ 回路はこれまでにネットワークスイッチ[1]、マイクロプロセッサ[2]、アクセラレータ[3] といった様々な計算機の高速化への応用が進められてきており、現在でも更なる省エネルギーコンピューティングを目指した研究開発が進められている[4]。計算機応用以外にもアナログ/ディジタル混在回路への応用も進められており、高速なクロックで動作するという

特長を生かした無線通信応用の広帯域アナログ/ディ ジタル変換器 [5][6] をはじめとして様々な超伝導検出 器の後段信号処理回路 [7]-[9] への応用研究が進められ ている。我々のプロジェクトでは超伝導ナノワイヤ単 一光子検出器 (Superconducting Nanowire Single Photon Detector: SSPD or SNSPD) [10] システムへの応用 として SFQ 回路に基づく後段信号処理回路の研究開 発に取り組んでいる。

我々のプロジェクトでは複数チャンネルの SSPD を 機械式冷凍機に実装したマルチチャンネル SSPD システムの開発に既に成功しており、通信波長帯 (1550 nm)の光波長において、80%を超えるシステム 検出効率を達成している[11]。既に量子情報通信分野 での応用を中心に数々の研究開発現場で利用されてお り、今中長期計画では宇宙通信、バイオ・医療等、更

なる応用範囲の拡大を目指した研究開発に取り組んで いる。SSPD の更なる応用範囲の拡大には、応用に応 じて様々な光波長に対応できる設計柔軟性に加えて、 マルチモードファイバと高効率に結合するための受光 面積の拡大や高速化も重要となる。SSPD は大面積化 するほどナノワイヤが長くなり、インダクタンスLが 増大するため、Lと負荷抵抗 Rの比(L/R)で決まる不 感時間(ある光子を検出してから次の光子を検出でき る状態に回復するまでの時間)が長くなる。この受光 面積と不感時間のトレードオフを解消するためには、 マルチピクセル化が効果的であり、研究開発のトレン ドとなっている。マルチピクセル SSPD を実現するう えでの最大のボトルネックは信号の読み出しで、個々 のピクセルからの信号をいかに室温環境に取り出すか が重要課題となる。様々な方式が提案されている が[12][13]、我々のプロジェクトではマルチピクセル SSPDと同一温度環境で動作する後段信号処理回路に SFQ 回路を利用し、冷凍機への熱負荷の要因となる読 み出しケーブル数を削減する手法を提案、実証実験で 世界をリードしてきた [14]。本稿では、まずこの SFQ 回路を用いた極低温信号処理技術について解説する。

一方、SFQ 回路は 20 mK という超極低温で動作す る超伝導量子ビットの制御・読出し回路としても注目 されている。超伝導量子ビットは1ビットごとに周波 数の異なるマイクロ波で制御する必要があり、現状は ビット数と同じ数(若しくはそれ以上の数)の同軸ケー ブルを用いて室温からマイクロ波制御信号を入力して いるが、ビット数が増大すると超伝導量子ビットを 20 mK 以下の温度まで冷却するための希釈冷凍機に 実装可能な配線数の限界を超えるのは避けられない。 超伝導量子ビットの制御用に4Kで動作するクライオ CMOSの開発も行われているが [15]、4 K と 20 mK を 接続するケーブル数は削減できないため、20 mK で動 作する超伝導量子ビット制御エレクトロニクスの開発 が切望されている。現状では SFQ 回路はニオブ (Nb) を超伝導電極とした集積回路プロセスを用いて作製さ れており、動作温度は4Kが想定されているが、 20 mK で動作させるには、消費電力を更に大幅に削減 する必要があり、動作電流を削減できる回路技術とし て窒化ニオブ (NbN) が非常に有望である。本稿では、 このNbN ベースのSFQ 回路作製プロセスについても、 我々の最近の取組を紹介する。

2 SFQ 回路の動作原理

超伝導の重要な性質として巨視的量子効果があり、 巨視的(人間の肉眼で見える)スケールで電子の波とし ての性質を利用できる。例えば、超伝導体で電気回路 的にループを構成した場合、そのループを周回する電 子の位相は2πの整数倍となり、ループ内に入る磁束 の量は離散値な値をとる。その最小単位を磁束量子と 呼び、 $\Phi_0 = h/2 e = 2.07 \times 10^{-15} Wb (h はプランク定数、$ eは素電荷)という値を持つ。SFQ 回路は超伝導ループ 内に磁束量子の有無を2値信号の「1」、「0」に対応させ る論理回路であり、東北大学の中島らにより提案さ れ[16]、その後モスクワ大学のリカレフらにより1990 年ごろに体系化された[17]。超伝導ループ内の磁束量 子の有無を切り替える能動素子としてジョセフソン接 合 (Josephson junction: IJ) が用いられる。半導体トラ ンジスタが電子の流れを制御するのに対して、IIでは 電子の位相を制御する。JJは超伝導電極の間に数ナノ メートル程度の障壁層を挟んだ構造を持ち、トンネル 効果によりこの障壁層をゼロ電圧で電流(ジョセフソ ン電流)が流れる。一方、電流がある臨界値(I)を超え ると、JJ が電圧状態に遷移(スイッチ)し、JJ の両端に 2πの位相差が発生する。この JJ を含む超伝導ループ には、IIの電極間に発生した2πの位相差に相当する 電流が流れ、磁束量子が超伝導ループに保持される。

図1(a)にSFQ回路における信号伝送路の等価回路 図、図1(b)にその顕微鏡写真を示す。これはジョセ フソン接合を含む超伝導ループを数珠繋ぎにして、電 源を接続したもので、ジョセフソン伝送線路 (Josephson transmission line: JTL) と呼ばれる SFQ 回路の最 も基本となる構成要素である。図1(a)において左端の II がスイッチすると、その右側の超伝導ループに磁束 量子が発生し、周回電流が流れる。電源から供給され る直流のバイアス電流とこの周回電流の和が右隣の JJのIcを超えると電圧状態にスイッチし、更に右側の 超伝導ループに磁束量子が発生する。以降、同じ動作 を繰り返し、磁束量子は右方向に JTL を伝搬してい く。ITL は磁束量子の伝搬という最も単純な動作であ るが、超伝導ループと JJ を組み合わせることで、複雑 な論理演算も実現できる。II がスイッチする際には II の両端に時間幅数ピコ秒(1兆分の1秒)、電圧レベル が半導体回路の1/1000以下である0.5 mV 程度のイン パルス状の電圧(SFQパルス)が発生する。このような ピコ秒オーダーの微小な電圧パルスが情報担体である ため、SFQ 回路は極めて高速かつ低消費電力で動作す る。また、マイクロストリップ線路と呼ばれる II を含 まない通常の超伝導配線でも SFQ パルスの伝送は可 能で、SFQ パルスは光速に匹敵する速度でマイクロス トリップ線路を伝搬する。このように、SFQ 回路は、 ゲートレベルでは半導体回路のようにあらゆる論理演 算を高速かつ低消費電力で実現でき、ゲート間では光 デバイスのように高速な信号伝送が可能であることか ら、半導体デバイスの機能性と光デバイスの高速性を

兼ね備えたディジタル回路と考えることができる。 現在の SFQ 回路では超伝導体をニオブ (Nb)、アル ミニウム酸化膜を障壁層に用いた Nb/AlO_x/Nb 接合が 主に用いられている。国内では産業技術総合研究所の クリーンルーム「CRAVITY」にある試作ラインで集積 回路チップが作製されている。これまでに FIFO (First-In First-Out)型のメモリであるシフトレジスタ の 120 GHz 動作 [18]、演算器等の 50 GHz 以上の動作 が実証されている [19]。

SFQ 回路はその低消費電力性と高速動作性から省 エネルギー情報処理への応用を目指して研究開発が進 められてきたが、アナログ/ディジタル混在回路にも 応用することが可能である。その一つに超伝導検出器 の後段信号処理技術への応用がある。SFQ 回路は4K まで冷却しないと動作しないため、計算機等への応用 では常に冷却コストが足かせとなるが、超伝導検出器 の後段信号処理は SFQ 回路の極低温で動作するとい う特徴を逆手に取った応用である。SFQ 回路を用いた 極低温信号処理には、①増幅器を介さずにディジタル 信号に変換できる、②ディジタル信号なので雑音耐性 に優れる、③数十GHzという高速動作が可能であるた め時分割多重が容易に行える、といった特長があり、 複数の超伝導検出器の出力を SFQ 回路で多重化する ことで極低温から室温までのケーブル数を減らすこと ができる。検出器のマルチピクセル化においては、室 温に信号を取り出すためのケーブルを介した冷凍機へ の熱流入が問題となるため、読み出しのケーブル数の 削減を可能とする SFQ 信号処理技術は非常に有用で ある。また、ディジタル回路であるため、多重化以外 にも様々な信号処理が可能で、検出器に新たな機能 (付加価値)を付加することも可能である。



図1 ジョセフソン伝送路 (JTL)の(a) 等価回路図、及び(b) 顕微鏡写真

3 SFQ 回路を用いた SSPD システムの高度化

表1にマルチピクセルSSPDの応用と要求されるシス テム性能、必要な後段信号処理についてまとめた。我々 のプロジェクトでは、高速・大面積なSSPDが必要とさ れる空間光通信(深宇宙通信)や蛍光相関分光への応用 を目指したシステム開発をそれぞれ宇宙通信研究室、 フロンティア創造総合研究室のバイオ ICT の研究者と 連携して進めており、そこでも SFQ 信号処理が不可欠 となっているが、必要とされる信号処理自体は多重化 という単純なものである。本稿では、もう少し複雑な信 号処理である光子同時計数と単一光子イメージングへ の応用に絞って SFQ 信号処理技術について解説する。

3.1 同時計数システム

光量子情報処理における重要な構成要素として2光 子干渉があり、入射した二つの光子が干渉すると、二 つある出力の一方に2個の光子が同時に出力されるた め、2個の光子を同時計数することで干渉の有無を判 別できる。忠実度の高い2光子干渉計の実現には、光 子源のジッタの低減に加えて、検出器が高検出効率で あること、検出器のジッタが小さいことが重要であり、 SSPD は忠実度の高い2光子干渉を実現するうえで非 常に有望な検出器である。しかしながら、室温のエレ クトロニクスで同時計数を行う場合には、配線やコネ クタ、計測器自身によるジッタが重畳するため、シス テム全体として SSPD の低ジッタという利点が生かせ ない可能性がある。我々のプロジェクトでは、SFQ 回 路による極低温下での信号処理により時間精度の高い 光子同時計数システムの実現を目指している。図2に 設計した SFQ 同時計数回路のブロックダイアグラム を示す。二つの入力ポートの入力端には磁気結合型 DC/SFQ converter (MC-DC/SFQ converter)と呼ば れる入力インターフェース回路 [20] があり、SSPD か

表 1 マルチピクセル SSPD システムの応用、要求されるシステム要求及び 必要な後段信号処理

応用	要求されるシステム性能	必要な後段信号処理
空間光通信 (深宇宙通信)	 ✓ マルチモードファイバ or 空間結合 → 大面積(> 100 µm角) ✓ 高計数率 ✓ PPM変調方式対応 → 低ジッタ 	信号多重化
蛍光相関分光	 ✓ マルチモードファイバ結合 → 大面積(~ 50 µm角) ✓ 10 ns以下の自己相関出力の検出 	同一チャンネルへの連続 入力を禁じた信号多重化
光子同時計数	 ✓ 2光子同時検出 ✓ 高時間精度 → 低ジッタ 	高時間精度での同時入力 の検出
単一光子 イメージング	 ✓ 大規模ピクセル ✓ 空間識別 ✓ 高時間分解 → 低ジッタ 	空間情報のディジタルコー ドへのエンコード+多重化



図 2 SFQ 同時計数回路のブロックダイアグラム。START 信号と STOP 信 号の入力順序を判定する回路になっている。

らの出力がSFQパルスに変換される。二つの入力の順 序により SFQ 回路から出力信号が得られるかが決ま る。SFQ 同時計数回路は、START 端子の方から早く 信号が来たときのみ信号を出力し、START 端子への 信号入力後ある特定の時間内(時間窓)にSTOP 端子へ の信号入力がない場合は信号を出力しない。入力端に SSPD ではなく高速なパルス発生器を接続することで、 SFQ 同時計数回路自体のジッタを評価することも可 能で、およそ 15 ps という優れた時間分解能で同時計 数が可能であることを確認した[21]。この SFQ 同時計 数回路と SSPD を接続して、古典光を用いた 2 光子干 渉実験にも成功した [22]。

また、SFQ 同時計数回路に改良を行い、二つの入力 の順序にかかわらずある時間内に二つの入力端子に信 号が入力されると信号が出力される回路の動作実証に 成功している。これは時間窓の中で光子の数を2個ま で計測できる光子数識別システムにも応用できる。こ の回路に室温のパルス発生器から入力を与えて時間窓 の評価を行った。図4に得られた結果を示す。縦軸が 二つの入力ポート両方から信号が入力された時に得ら れる出力信号のカウント数、横軸が二つの入力信号の 時間差を示している。入力信号の時間差が0付近のあ る時間領域でのみエラーフリーで同時入力の出力が得 られており、一方のポートのみに入力があった場合の 出力と合わせて、入射光子数"0"、"1"、"2"を判別でき る光子数識別器が実現できる。図3では回路へのバイ アス電流が12 mA、16 mA、20 mAの3種類の結果 を示しているが、供給するバイアス電流で同時計数と みなす時間窓の幅を調整できることが分かる。この回 路をSSPDと接続し、2光子までの光子数識別システ ムとしての動作を確認しており、大阪大学で開発を進 める非古典光を用いた2光子干渉システムでも使用さ れている。

3.2 単一光子イメージングシステム

マルチピクセル SSPD のピクセル数を大幅に増やす ことができれば、光子計数感度を持つ究極のカメラを 実現できる。多くのイメージセンサが1 µm 以下の光



図3 SFQ 光子数識別回路で得られた実験結果。二つの入力信号の時間差 を横軸に取り、縦軸は二つの信号を検出した時のカウント数である。 二つの入力信号の時間差が小さい時にカウント数が増加しており、こ の領域が時間窓となる。



図 4 (a) 64 ch イベント駆動型 SFQ エンコーダの顕微鏡写真。(b) 64 ピ クセル SSPD アレイと接続して、光子照射を行って得られた光子検出 分布。

波長に感度を持つのに対して、SSPDでは紫外から中 赤外という幅広い波長範囲で使用できるため、生体深 部に侵入する1μm付近の光波長を使用したバイオイ メージングや、中赤外領域の超高感度イメージセンサ、 SSPDの低ジッタという特長を生かした超高精度の測 距イメージング等、幅広い応用が可能となる。イメー ジングシステムを実現するためには2次元状に配列さ れた大規模な SSPD アレイが必要となり、それに伴う 配線数の増大を極力抑える信号処理が必要不可欠であ

る。このイメージングシステム実現のためにイベント 駆動型SFQエンコーダ回路によりSSPDの位置と時間 情報を取得するイメージングシステムの開発を進めて きた。エンコーダ回路とは、光子を検出したピクセル の位置情報を符号化(コード化)して1本のケーブルで 読み出すための回路である。また、この回路は光子を 検出するごとに回路内部でクロックを生成するイベン ト駆動型の回路となっていることから、光子の位置情 報だけでなく時間情報も取得できる回路になっている。 図4(a)に64入力のイベント駆動型SFQエンコーダの 顕微鏡写真を示す。従来の設計パラメータでは駆動さ せるためのバイアス電流量が300 mA を超えてしま い、冷凍機内の配線でのジュール熱により小型機械式 冷凍機の温度が上昇してしまう可能性があった。そこ でバイアス電流を削減させるために、IIのLを従来の 設計の1/2まで減少させ、駆動させるために必要な総 バイアス電流量を200 mA以下まで抑制した。この回 路は、SSPD のあるピクセルに対してその位置情報を 符号化したディジタルコード(アドレス)を時間情報と 共に生成し、すべてのピクセルからの出力信号を1本 のケーブルで読み出すことができる。大規模 SSPD ア レイをイメージングカメラとして使用するには、光子 検出の空間的な分布をリアルタイムで観測・表示する 必要がある。そのため SFQ エンコーダだけでなく、 SFQ エンコーダの出力信号から出力値を換算し、2次 元状に配置された SSPD のどこに光子が入射したかを リアルタイムで表示する Field programmable gate array (FPGA)の開発も行った。図4(b)に64 ピクセル SSPD アレイと 64 ch イベント駆動型 SFQ エンコーダ を用いて得られた光子検出数の分布を示す。これは FPGA を用いてリアルタイムで得られた光子検出分布 の静止画像である。現状では、意味のあるイメージを 再現したわけではないが、64 ピクセル SSPD のすべて のピクセルが同時に動作していることが確認できた。 また、出力信号のタイミングジッタを評価し、64 ch イ ベント駆動型 SFQ エンコーダを通して信号の処理・読 出しを行なっても 56.5 ps という高時間精度を有して いることを実証した[23]。

我々はSSPDアレイ規模の更なる拡張を目指して、 行列読出という新たな方式を採用して大規模SSPDア レイシステムの開発を進めている。行列読出方式自体 はアメリカ国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology: NIST)のグループによっ て提案された読出方式であり、N×Nのマトリクス状 に配置されたSSPDアレイに対して行と列から2N本 の読出配線で信号を読み出すことができる[24][25]。し かしながら、この方式でも100×100ピクセルのSSPD アレイを実現するためには、200本の読出しケーブル が必要で、冷凍機への実装は容易ではない。我々のプ ロジェクトでは、この NIST が提案した行列読出方式 とSFQ信号処理を組み合わせて、行と列の出力をイベ ント駆動型 SFQ エンコーダでアドレス情報をディジ タルコードにエンコードして、行と列のそれぞれから 2本のケーブルで室温に信号を取り出す方式を提案し 実証実験を進めている。4×4ピクセル SSPD アレイ を用いて原理実証に成功し[26]、現在 32 × 32 ピクセ ルの動作実証に取り組んでいる。32×32ピクセルに 対応した SFQ エンコーダに必要な入力配線数は2× 32本であり、64 ch イベント駆動型 SFQ エンコーダと 同じ入力数、つまりほぼ同じ規模の回路で実現するこ とができる。我々は32×32ピクセルに対応した 2 × 32 ch イベント駆動型 SFQ エンコーダの設計・作 製を行い、評価を行った。図5(a)に回路の顕微鏡写真、 図5(b)に得られた出力波形の一例を示す。動作テス トは液体ヘリウムでチップを冷却し、パルスパターン 発生器を用いて行と列のそれぞれの入力ポートに信号 を入力して行った。全ての入力ポートをテストした結 果、正しいアドレスコードが出力されることを確認し た[27]。現在、32 × 32 ピクセル SSPD アレイの試作 を行っている段階で、近い将来 SSPD アレイと SFQ エ ンコーダを組み合わせて動作実証を行う予定である。



図 5 (a) 2 × 32 ch イベント駆動型 SFQ エンコーダの顕微鏡写真。(b) 単 独試験で得られた SFQ 回路からの出力波形。行と列のアドレスデー タが生成されている。

4 2 窒化ニオブ系 SFQ 回路

超伝導量子ビットは量子コンピュータを実現する ハードウェアの最有力候補と目されており、昨年 Google が53量子ビットを集積化した超伝導回路で量 子超越性を実証して話題となった。現在、100量子ビッ ト程度を目標として研究開発が進められているが、い わゆる汎用型の量子コンピュータを実現するためには、 更に2~3桁の集積規模の拡大が必要である。まえが きでも述べたとおり、超伝導量子ビットの規模拡大に おける最大のボトルネックは希釈冷凍機に実装できる 配線数である。ビット数と同じかそれ以上の配線数が 必要となるため、この配線数をいかに削減するかが 重要課題となる。超伝導量子ビットを制御するための マイクロ波パルスを超伝導量子ビットと同じ20 mK で生成できれば、配線数を大幅に削減することが可能 となるため、既にいくつかの研究機関で SFQ 回路を 使用した超伝導量子ビットの制御が試みられてい る [28][29]。

希釈冷凍機の 20 mK における冷却能力は 30 µW 程 度であるのに対して、現状の4Kで動作するSFQ回 路の消費電力は10,000 個の JJ から成る回路で1 mW 程度であり、SFQ 回路を 20 mK で動作させるには大 幅な消費電力の削減が必要である。しかし、20 mK で は4Kに比べて熱雑音が1/200と小さいため、JJのIc を4Kの1/200(1 µA程度)としても原理的には動作 する。SFQ 回路の消費電力はおよそ Ic に比例するた め、20 mK における消費電力は 10,000 個の JJ から成 る回路でも5 µW 程度と見積もられ、希釈冷凍機の冷 却能力よりも十分小さい消費電力で動作することが見 込まれる。問題はSFQを保持するための超伝導ループ のインダクタンスLで、通常、SFQ回路ではLとIc の積が磁束量子 Φ。の半分となるように設計するため、 20 mKでの動作には1 nH程度のLが必要となる。1 nH のインダクタンスを超伝導材料として Nb を用いて実 現するためには、2 µmの線幅で長さがおよそ2 mm 必 要となる。チップサイズが5mm~20mm角であるこ とを考えると、たった一つの超伝導ループを作るのに 2 mm もの長さが必要では、高密度な集積化を考える と絶望的である。多結晶の NbN 薄膜を利用すること で、Nbの1/10以下の線長で1 nHを実現でき、超伝 導ナノワイヤで培った超薄膜の技術を使えば更にこの 長さを短縮できる可能性があるため、NbN 集積回路は 20 mK で動作する SFQ 回路を実現するための回路技 術として非常に魅力的である。また、Nb/AlOx/Nb 接 合のAlOxはAlの自然酸化により形成されるが、1 uA の低 L を実現するには、実用的とは言えない長時間の 酸化時間を必要とするが、我々のプロジェクトで開発



図6 作製した NbN SFQ 回路の顕微鏡写真

している NbN/AlN/NbN 接合では AlN を反応性ス パッタで形成するため、成膜時間の制御で容易に $1 \mu A$ の低 I_c を実現できる [30]。

Nbの超伝導転移温度 (T_c) がおよそ9Kであるのに 対して、窒化ニオブ (NbN) の $T_{\rm c}$ は 16 K あるため、 NbN 集積回路技術により、20 mK での動作だけでな く、現在主流の Nb 集積回路の動作温度である4Kよ りも高い10Kで動作するSFQ回路を実現することも できる。10 K で動作すれば、冷却効率(到達温度での 冷却パワー/冷凍機への投入パワー)が4K冷凍機よ りも6倍程度優れた10K冷凍機での冷却が可能であ る。高速性、低消費電力性に優れた SFQ 回路ではある が、冷却に必要な電力まで含めて半導体技術に対して 優位性を打ち出すためには、冷凍機の冷却効率で有利 な 10 K 動作は不可欠である。我々は NbN/AlN/NbN 3層膜から成る II を用いた SFQ 回路の開発を進めて おり、図6に示すように0.5 µmの位置分解能で集積 回路を作製する技術を既に確立している。今後、この 回路を10Kで評価していくと同時に、20mKで動作 する回路設計、20 mK での測定・評価環境を整備して いく予定である。

5 今後の展望

SFQ 回路は低消費電力性・高速応答性を持つという 特長からポスト半導体のデバイスとして注目されこれ まで研究が進められてきており、現在では実用化に向 けた段階に入ってきている。NICT では SFQ 信号処理 回路を組み込んだマルチピクセル SSPD システムの早 期実用化及び超伝導量子ビットの極低温下での制御・ 読出し技術確立を目指して開発を進めている。本稿で は紹介できなかったが、SSPD と SFQ 回路を一つの チップ上に作製したモノリシックチップの開発も進め ており、更なる SSPD システムの高度化を図っている。 また、NbN 集積回路に関しても NICT では NbN を用 いた磁性接合による量子ビットの実証に成功しており、 20 mK で動作する NbN 集積回路と組み合わせること で従来の手法では到達できない規模の超伝導量子ビッ ト数の実現が期待される。

SFQ 回路による極低温信号処理は、既存の超伝導デ バイスのシステムに様々な機能を付加することが可能 であり、本稿で述べたシステム以外にも多岐にわたる 用途が考えられる。特に SSPD に関しては、様々な研 究機関からデバイスの提供が求められており、ユー ザーは非常に多い。SFQ 回路を組み込んだシステム実 用化にはこれらのユーザーからの要求に応じて的確な 信号処理回路の開発を行いシステムの提供を行うこと が重要であり、応用分野の拡大につながると考えてい る。

謝辞

本稿の執筆にあたり、日頃から議論していただいて いるフロンティア創造総合研究室・超伝導デバイスプ ロジェクトの寺井弘高上席研究員、三木茂人主任研究 員、丘偉主任研究員、藪野正裕研究員、知名史博研究 員、川上彰主任研究員、今村三郎研究技術員、菱田有二 研究技術員に深く感謝する。また、SFQ 回路の作製で ご協力いただいた産業技術総合研究所の永沢秀一氏、 日高睦夫氏、2光子同時計数システムに関して有益 なご議論を頂いた大阪大学大学院基礎工学研究科の 山本俊教授、生田力三助教に感謝する。

本研究の一部は JSPS 科研費 (JP18H05245, JP19H05615, JP19H02206, JP19K15057)、JST CREST (JPMJCR1671) の助成を受けたものである。

【参考文献】

- Y. Kameda, Y. Hashimoto, and S. Yorozu, "Design and Demonstration of a 4 x 4 SFQ Network Switch Prototype System and 10-Gbps Bit-Error-Rate Measurement," IEICE Trans. Electron., vol.E91-C, no.3, pp.333–341, March 2008.
- 2 Y. Yamanashi, M. Tanaka, A. Akimoto, H. Park, Y. Kamiya, N. Irie, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Terai, and Y. Hashimoto, "Design and Implementation of a Pipelined Bit-Serial SFQ Microprocessor, CORE1⁶," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, no.2, pp.474–477, June 2007.
- 3 N. Takagi, K. Murakami, A. Fujimaki, N. Yoshikawa, K. Inoue, and H. Honda, "Proposal of a desk-side supercomputer with reconfigurable data-paths using rapid single-flux-quantum circuits," IEICE Trans. Electron., vol.E91-C, no.3, pp.350–355, March 2008.
- 4 R. Sato, Y. Hatanaka, Y. Ando, M. Tanaka, A. Fujimaki, K. Takagi, and N. Takagi, "High-speed operation of random-access-memory-embedded microprocessor with minimal instruction set architecture based on rapid single-flux-quantum logic," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.27, no.4, 1300505, June 2017.
- 5 A. Fujimaki, K. Nakazono, H. Hasegawa, T. Sato, A. Akahori, N. Takeuchi, F. Furuta, M. Katayama, and H. Hayakawa, "Broad Band Software-Defined Radio Receivers Based on Superconductive Devices," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.11, no.1, pp.318–321, March 2001.
- 6 D. Gupta, T. V. Filippov, A. F. Kirichenko, D. E. Kirichenko, I. V. Vernik,

A. Sahu, S. Sarwana, P. Shevchenko, A. Talalaevskii, and O. A. Mukhanov, "Digital Channelizing Radio Frequency Receiver," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, no.2, June 2007.

- 7 A. Bozbey, S. Miyajima, H. Akaike, and A. Fujimaki, "Single-Flux-Quantum Circuit Based Readout System for Detector Arrays by Using Time to Digital Conversion," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19, no.3, pp.509–513, June 1999.
- 8 S. Miyajima, T. Kusumoto, K. Ito, Y. Akita, I. Yagi, N. Yoshioka, T. Ishida, S. Miki, Z. Wang, and A. Fujimaki, "High-Throughput RSFQ Signal Processor for a Neutron Diffraction System with Multiple MgB₂ Detectors," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.23, no.3, 1800505, Jan. 2013.
- 9 K. Sano, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Design and Demonstration of a Single-Flux-Quantum Multi-Stop Time-to-Digital Converter for Timeof-Flight Mass Spectrometry," IEICE Trans. Electron., vol.E97.C, no.3, pp.182–187, March 2014.
- 10 G. N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and R. Sobolewski, "Picosecond superconducting single-photon optical detector," Appl. Phys. Lett., vol.79, no.6, pp.705–707, Aug. 2001.
- 11 http://www.nict.go.jp/press/2016/10/24-1.html
- 12 M. Hofherr, M. Arndt, K. Il'in, D. Henrich, M. Siegel, J. Toussaint, T. May, and H.-G. Meyer, "Time-tagged multiplexing of serially biased superconducting nanowire single-photon detectors," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.23, no.3, 2501205, June 2013.
- 13 S. Doerner, A. Kuzmin, S. Wuensch, I. Charaev, F. Boes, T. Zwick, and M. Siegel, "Frequency-multiplexed bias andreadout of a 16-pixel superconducting nanowire single-photon detector array," Appl. Phys. Lett., vol.111, no.3, 032603, July 2017.
- 14 H. Terai, S. Miki, and Z. Wang, "Readout electronics using single-fluxquantum circuit technology for superconducting single-photon nanowire detector array," IEEE Trans Appl. Supercond., vol.19, no.3, pp.350–353, June 2009.
- 15 B. Patra, J. P. G. van Dijk, S. Subramanian, A. Corna, X. Xue, C. Jeon, F. Sheikh, E. J.-Hernandez, B. P. Esparza, H. Rampurawala, B. Carlton, N. Samkharadze, S. Ravikumar, C. Nieva, S. Kim, H.-J Lee, A. Sammak, G. Scappucci, M. Veldhorst, L. M. K. Vandersypen, M. Babaie, F. Sebastiano, E. Charbon, and S. Pellerano, "A Scalable Cryo-CMOS 2-to-20GHz Digitally Intensive Controller for 4x32 Frequency Multiplexed Spin Qubits/Transmons in 22nm FinFET Technology for Quantum Computers," 2020 IEEE International Solid- State Circuits Conference (ISSCC), San Francisco, pp.304–306, 2020.
- 16 K. Nakajima, Y. Onodera, and Y. Ogawa, "Logic design of Josephson network," J. Appl. Phys., vol.47, no.4, pp.1620–1627, April 1976.
- 17 K. K. Likharev and V. K. Semenov, "RSFQ logic/memory family: a new Josephson-junction technology for sub-terahertz-clock-frequency digital systems," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.1, no.1, pp.3–28, March 1991.
- 18 H. Akaike, T. Yamada, A. Fujimaki, S. Nagasawa, K. Hinode, T. Satoh, Y. Kitagawa, and M Hidaka "Demonstration of a 120 GHz single-fluxquantum shift register circuit based on a 10 kA cm⁻² Nb process," Supercond. Sci. Technol., vol.19, no.5, S320, March 2006.
- 19 X. Peng, Q. Xu, T. Kato, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, N. Takagi, K. Takagi, and M. Hidaka, "High-speed demonstration of bit-serial floating-point adders and multipliers using single-flux-quantum circuits," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.25, no.3, 1301106, June 2015.
- 20 H. Terai, T. Yamashita, S. Miki, K. Makise, and Z. Wang, "Low-jitter single flux quantum signal readout from superconducting single photon detector," Opt. Exp., vol.20, no.18, pp.20115–20123, Aug. 2012.
- 21 S. Miyajima, S. Miki, M. Yabuno, T. Yamashita, and H. Terai, "Timing discriminator based on single-flux-quantum circuit toward high timeresolved photon detection," Supercond. Sci. Technol., vol.30, no.12, 12LT01, Oct. 2017.
- 22 S. Miki, S. Miyajima, M. Yabuno, T. Yamashita, T. Yamamoto, N. Imoto, R. Ikuta, R. A. Kirkwood, R. H. Hadfield, and H. Terai, "Superconducting coincidence photon detector with short timing jitter," Appl. Phys. Lett., vol.112, no.26, 262601, June 2018.
- 23 S. Miyajima, M. Yabuno, S. Miki, T. Yamashita, and H. Terai, "High-timeresolved 64-channel single-flux quantum-based address encoder integrated with a multi-pixel superconducting nanowire single-photon detector," Opt. Exp., vol.26, no.22, pp.29045–29054, Oct. 2018.

- 24 V. B. Verma, R. Horansky, F. Marsili, J. A. Stern, M. D. Shaw, A. E. Lita, R. P. Mirin, and S. W. Nam, "A four-pixel single-photon pulse-position array fabricated from WSi superconducting nanowire single-photon detectors," Appl. Phys. Lett., vol.104, no.5, 051115, Feb. 2014.
- 25 M. S. Allman, V. B. Verma, M. Stevens, T. Gerrits, R. D. Horansky, A. E. Lita, F. Marsili, A. Beyer, M. D. Shaw, D. Kumor, R. Mirin, and S. W. Nam, "A near-infrared 64-pixel superconducting nanowire single photon detector array with integrated multiplexed readout," Appl. Phys. Lett., vol.106, no.19, 192601, May 2015.
- 26 M. Yabuno, S. Miyajima, S. Miki, and H. Terai, "Scalable implementation of a superconducting nanowire single-photon detector array with a superconducting digital signal processor," Opt. Exp., vol.28, no.8, pp.12047–12057, April 2020.
- 27 S. Miyajima, M. Yabuno, S. Miki, and H. Terai, "Single-Flux-Quantum Based Event-Driven Encoder for Large-Pixel Superconducting Nanowire Single-Photon Detector Array," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.29, no.5, 2200804, Aug. 2019.
- 28 R. McDermott, M. G. Vavilov, B. L. T. Plourde, F. K. Wilhelm, P. J. Liebermann, O. A. Mukhanov, and T. A. Ohki, "Quantum–classical interface based on single flux quantum digital logic," Quantum Sci. Technol., vol.3, no.2, 024004, Jan. 2018.
- 29 C. Howington, A. Opremcak, R. McDermott, A. Kirichenko, O. A. Mukhanov, and B. L. T. Plourde, "Interfacing Superconducting Qubits with Cryogenic Logic: Readout," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.29, no.5, 1700305, Aug. 2019.
- 30 Z. Wang, H. Terai, W. Qiu, K. Makise, Y. Uzawa, K. Kimoto, and Y. Nakamura, "High-quality epitaxial NbN/AIN/NbN tunnel junctions with a wide range of current density," Appl. Phys. Lett., vol.102, no.14, 142604, April 2013.



宮嶋茂之 (みゃじま しげゆき)
 未来 ICT 研究所
 フロンティア創造総合研究室
 研究員
 博士 (工学)
 超伝導エレクトロニクス