テーマ解説

単一磁束量子回路を用いた極低温信号処理による超伝導ナノワイヤ 単一光子検出器のマルチピクセル化

寺井 弘高^{*1,†}, 三木 茂人^{*1,*2}, 山下 太郎^{*1}, 宮嶋 茂之^{*1}, 藪野 正裕^{*1}

Cryogenic Signal Processing Using Single-flux-quantum Circuit for High Performance Multi-pixel Superconducting Nanowire Single-photon Detectors

Hirotaka TERA^{*1,†}, Shigehito MIKI^{*1,*2}, Taro YAMASHITA^{*1}, Shigeyuki MIYAJIMA^{*1} and Masahiro YABUNO^{*1}

Synopsis: Superconducting nanowire single-photon detectors (SSPDs) with a system detection efficiency (SDE) of over 80% are now commercially available and being used in compact Gifford-McMahon refrigerators. However, not only high SDE, but also total performance including a low dark count rate, high maximum count rate and/or low timing jitter are important for many applications. A multi-pixel SSPD combined with signal processing using a single-flux-quantum (SFQ) circuit is a very promising approach to improve the system performance of SSPDs. In this review, we introduce our recent activities on cryogenic signal processing using SFQ circuits to realize high-performance multi-pixel SSPDs.

Keywords: cryogenic signal processing, SFQ circuit, multi-pixel SSPD, low jitter

(Some figures in this article may appear in color only in the electronic version.)

1. はじめに

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD) は、高検出効率、高最大計数率、低暗計数率、低ジッタ、広波長帯域という特長を有し、世界中の研究機関で活発な研究開発が行われている¹⁻³⁾。現在、通信波長帯 (1.55 μm) では半導体を用いた InGaAs アバランシェフォトダイオード (APD) の検出効率 (約 20%) を圧倒的に凌駕する 80% を超えるシステム検出効率を実現しており⁴⁻⁶⁾、量子暗号通信システムを始めとする数々のシステム実証実験ですでに利用されている⁷⁾。NICT が開発した SSPD システムは、0.1 W の冷却能力を持つ機械式の Gifford McMahon (GM) 冷凍機に実装されており、液体ヘリウムの補充が不要、100 V 電源で駆動可能、水冷も不要であるため、設置

場所を選ばず誰でも手軽に使用できる⁸⁾。最近では、さらに応用分野を拡げるべく、バイオ・医療分野や深宇宙通信等、量子情報以外の分野への適用も進めており、通信波長帯以外の波長でも高い検出効率を有する SSPD の開発に成功している^{9,10)}。しかしながら、1.55 μm 以下の光波長では、70%を超える検出効率が達成されている Si APD や光電子増倍管 (PMT) 等がライバルとなる。今後これらのライバルと競合し SSPD の応用範囲を拡大していくためには、検出効率だけでなく、必要に応じて、最大計数率、暗計数率、ジッタ等、総合的な性能で Si APD や PMT を凌駕する必要がある。

SSPD の不感時間 (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時間) は、原理的には入射光子により発生したホットスポットの準粒子緩和時間で決まり、1 GHz の最大計数率の実現も可能と考えられる。しかしながら、コア径 10 μm 程度のシングルモードファイバと損失なく結合するためには 15 μm 角程度の受光面積が必要であり、幅 100 nm の超伝導ナノワイヤをメアンダ状に受光面全体に敷き詰めると、ナノワイヤのカイネティックインダクタンス L_K は 1 μH にも達する。その結果、SSPD の不感時間は L_K と負荷抵抗 R との比である L_K/R 時定数により決まり、現状の SSPD の最大計数率は数 10 MHz に制限されている。また、応用によっては (特に可

Received June 26, 2017

^{*1} (国立研究開発法人) 情報通信研究機構 未来 ICT 研究所
〒651-2492 兵庫県西区岩岡町岩岡 588-2

Advanced ICT Research Institute, National Institute of Information
and Communications Technology, 588-2 Iwaoka, Nishi-ku, Kobe,
Hyogo 651-2492, Japan

^{*2} 神戸大学大学院工学研究科

〒657-0013 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1
Kobe University, 1-1 Rokko-dai cho, Nada-ku, Kobe, Hyogo
657-0013, Japan

[†] E-mail: terai@nict.go.jp

DOI: 10.2221/jcsj.52.340

Fig. 1 Cryogenic signal processing using a SFQ circuit for a multi-pixel SSPD. The number of readout RF cables can be reduced by cryogenic signal processing using the SFQ circuit.

視波長帯で使用する場合)、コア径が 50 μm のマルチモードファイバとの結合が必要であり、さらに大きな受光面積が必要となる。その結果、不感時間が増大し、最大計数率はさらに低下する。つまり、SSPD の受光面積と最大計数率の間にはトレードオフがあり、大きな受光面積と高速性を両立することは本質的に困難である。

この課題の克服を目指して、SSPD のマルチピクセル化が提案されている¹¹⁾。マルチピクセル化により、全体としてファイバとの結合に必要な受光面積を確保しつつ、個々のピクセルを小型化することで、検出効率を犠牲にすることなく高速化が可能である。また、受光面の大面積化による不感時間の増大を抑制することもできる。マルチピクセル化により別々のピクセルに同時入射した複数の光子を検出できるため、疑似的ではあるがシングルピクセルの SSPD では不可能だった光子数識別能力を備えた光子検出器が実現も可能である。将来的に百万ピクセル規模のマルチピクセル化が可能となれば、フォトンカンテイングレベルの感度を持つ究極のカメラの実現も夢ではない。

マルチピクセル SSPD を実現する上でボトルネックとなるのが各々のピクセルからの出力信号の読み出しである。ピクセル数が増大すると、信号読み出し用の RF ケーブルが増えるため、冷凍機への熱負荷が増大し、現在 SSPD システムで使用している 0.1 W GM 冷凍機への実装が困難となる。NICT では、世界に先駆けて単一磁束量子 (Single Flux Quantum: SFQ) 論理回路による極低温信号処理を提案し、実証実験を進めてきた¹²⁻¹⁶⁾。Fig. 1 にマルチピクセル SSPD を実現するための SFQ 信号処理の概念図を示す。SFQ 回路により極低温環境下で信号処理を行うことができれば、読み出しケーブル数を大幅に削減することが可能となり、マルチピクセル SSPD を実現する上で極めて有効である。SFQ 回路を用いた極低温信号処理は、4 ピクセル多重化動作の実証や、光子数識別 SSPD の開発等、NICT 以外の研究機関でも活発に研究されている^{17, 18)}。本

稿では、SFQ 回路を用いた極低温信号処理による SSPD のマルチピクセル化について、NICT におけるこれまでの取り組みを紹介する。

2. SSPD/SFQ インターフェース

2.1 磁気結合型 DC/SFQ 変換器

SFQ 回路は 100 GHz を超えるクロック周波数での動作が可能であり¹⁹⁾、1 万個のジョセフソン接合 (半導体回路のトランジスタに相当) を含む回路が数 mW という低消費電力で動作することがすでに実証されている²⁰⁾。スーパーコンピュータやデータセンタ等の大規模システムを目指した研究開発が活発に行われているが、中小規模 (1 万接合以下) の SFQ 回路であれば SSPD と同じ 0.1 W GM 冷凍機で動作可能であり、マルチピクセル SSPD の後段信号処理回路としても非常に魅力的である。

SSPD の後段信号処理回路として SFQ 回路を利用する上で最も重要となるのが SSPD と SFQ 回路を接続するためのインターフェース回路である。典型的な SSPD の出力電流は 20 μA 程度である一方、外部信号により SFQ パルスを生成する DC/SFQ 変換器と呼ばれる回路の電流感度は 100 μA 程度である。SSPD の出力信号を SFQ パルスに変換するためには電流増幅が必要であり、NICT では磁気結合型 DC/SFQ (MC-DC/SFQ) 変換器と呼ばれるインターフェース回路を提案した¹²⁾。Fig. 2 にその等価回路と顕微鏡写真を示す。なお、本稿で述べる SFQ 回路については、NICT で設計を行い、産業技術総合研究所 CRAVITY が提供する Nb 2.5 kA/cm²h 標準プロセスを用いたファンドリサービスを利用して作製した²¹⁾。MC-DC/SFQ 変換器は DC/SFQ 変換器の入力部のインダクタンスが磁気コイルと結合した構造となっており、この磁気トランスフォーマーを介して信号を入力することで電流利得を稼いでいる。現状の回路では、8 巻きのコイルを採用しており、入力コイルとそれに結合したワッシャーリングの相互インダクタ

Fig. 2 (a) Equivalent circuit of a MC-DC/SFQ converter. (b) Photograph of a MC-DC/SFQ converter.

ンスは約 66 pH、ワッシャーリングのインダクタンスは約 11 pH で、電流利得は 6 程度である。さらに、回路に含まれるジョセフソン接合の臨界電流値を最適化した結果、現状では 10^{-6} 以下のエラーレートを達成するのに必要な入力電流の最小値（最大電流感度）として $8.2 \mu\text{A}$ を実験的に確認している¹⁶⁾。

2.2 SFQ 回路による低ジッタ信号読み出し

SFQ 回路入力部の電流感度が向上したことで、SFQ 回路をプリアンプとして SSPD から低ジッタでの信号読み出しが可能である。**Fig. 3** に SSPD を直接室温の低ノイズアンプ（LNA）と接続して信号を読み出した場合（通常の読み出し方法）と、SFQ 回路を介して信号を読み出した場合でジッタを比較した結果を示す。SSPD のジッタは使用する LNA や時間相関単一光計測（TCSPC）モジュールのジッタにも大きく依存し、SSPD からの出力信号が大きいほど（出力信号の SN 比が大きいほど）読み出しジッタは低減する。実際、バイアス電流が $60 \mu\text{A}$ を超える SSPD で 18 ps のジッタが報告されているが、同一の測定系でも SSPD へのバイアス電流が $20 \mu\text{A}$ 以下ではジッタが 40 ps 以上に上昇する²²⁾。SSPD の検出効率は、臨界温度の低い超伝導材料を用いる、あるいはナノワイヤのボリュームを小さくする（より薄く、細いナノワイヤを用いる）ことで向上するが、結果として臨界電流（つまりバイアス電流）が減少し、ジッタは増大する。つまり、検出効率とジッタの間にはトレードオフの関係にあり、その両立が課題となっている。

我々の通常の読み出し方法では、ラッチ現象と呼ばれる SSPD の熱暴走を抑制するため、SSPD と並列に 50Ω の抵抗を接続している。その結果、LNA に流れ込む電流が半減し、ジッタは 50Ω の抵抗を接続しない場合に比べて増

Fig. 3 I_{SSPD} dependence of SSPD FWHM jitter. The measured jitter is plotted for a conventional readout with and without a 50Ω shunt resistor and for the SFQ readout.

大し、臨界電流に近い $18 \mu\text{A}$ のバイアス電流では 67 ps 程度である。一方、SFQ 信号読み出しでは、SSPD と SFQ 回路をバイアスティーのキャパシタを介さず直流で結合できるため、 50Ω の並列抵抗なしでも臨界電流に近いバイアス電流まで安定動作が可能であり¹⁴⁾、結果として SSPD のジッタが $18 \mu\text{A}$ のバイアス電流に対して 37 ps と通常読み出しに比べて大幅に低減できる。しかし、バイアス電流が $15 \mu\text{A}$ 以下では急激にジッタが増大することから、臨界電流の小さい SSPD に適用するためには入力インターフェース回路（MC-DC/SFQ 変換器）の入力感度のさらなる向上が必要である。

一方、SFQ 比較器と呼ばれる回路は 1 ps 以下の精度で時間弁別ができるため²³⁾、単にプリアンプとしてだけでなく、室温の LNA や TCSPC モジュールの時間弁別まで含めた機能を SFQ 回路により実現することで、SSPD の低ジッタという特長を最大限に引き出すことが可能と考えられる²⁴⁾。SFQ 回路単体の評価ではあるが、電流値 $20 \mu\text{A}$ 程度の入力パルスに対して、MC-DC/SFQ 変換器込みで 10 ps 程度の精度で時間弁別できることを確認している²⁴⁾。LNA を極低温で動作させることで 15 ps 以下のジッタが実現されているが²⁵⁾、それよりも高い時間精度で時間弁別できる可能性がある。例えば、暗視野 3D イメージングシステムや LIDAR (Light Detection and Ranging) のような時間分解能で深さ方向の空間分解能が決まる計測応用や²⁶⁾、2 光子干渉計²⁷⁾、光子数識別システム²⁸⁾といった応用に SFQ 信号処理を適用することで、非常に高い時間精度を持つシステムの実現が期待される。

3. SFQ 信号処理回路

3.1 信号多重化回路

SFQ 回路を用いた極低温信号処理として、最も単純かつ重要な回路が信号多重化回路である。これは各ピクセルからの信号を SFQ パルスに変換したのち、1 チャンネルに多重化して出力する回路で、2 つの入力信号を 1 つの出力に合流する Confluence Buffer (CB) と呼ばれる SFQ セルを用いて簡単に構成できる^{15, 29)}。ただし、SFQ パルスは時間幅数ピコ秒、電圧 0.5 mV の微弱信号であるため、最終的に信号を外部に取り出す際には、電圧ドライバと呼ばれる回路で、時間幅約 1 ナノ秒、電圧 1.6 mV のパルス形状に成形して信号を出力する。

我々はこれまでに 4 ピクセル SSPD アレイのクロストークフリー動作の実証に成功し¹⁵⁾、現状では最大で 8 ピクセルの信号多重化まで動作を実証することに成功している。

Fig. 4 に 8 ピクセル SSPD アレイと SFQ 多重化回路を実装した写真を示す。SFQ 多重化回路については、16 チャンネルの入力を持つ回路のうち 8 チャンネルを使用して信号多重化を行った。また、8 ピクセル SSPD アレイについては、8 つのピクセルに光子が当たる確率を均等にするため、インターリーブ型と呼ばれる各々のピクセルのナノワイヤが折り重なったメアンダ構造を採用した。このパッケージブロックを 0.1 W GM 冷凍機に実装し、バイアス電流や入射光子数を変えながらシステム検出効率を評価した。その結果、SFQ 回路からの出力カウントから見積もったシステム検出効率として 70%を確認した。

次に、バイアス電流を一定として、入射光子数を変えながらシステム検出効率を測定した。その結果を Fig. 5 に示す。横軸を入射光子数ではなく、出力カウント数で表示している。最大計数率をシステム検出効率が 3 dB 低下する入射光子数と定義した場合、検出効率の低い素子ほど SSPD のスイッチ回数が少ないため、最大計数率を過大評価することになる。そこで、我々は横軸を出力カウント数で表示して、システム検出効率が半になるカウント数を最大計数率と定義した。Fig. 5 から 8 ピクセル SSPD の最大計数率は 38 MHz 程度であることがわかる。

事前に個々のピクセルについて通常読み出しで評価した最大計数率は約 12 MHz であった。8 ピクセル全体では、個々のピクセルでの光子入射確率は 1/8 になるため、理想的には $12 \text{ MHz} \times 8 = 96 \text{ MHz}$ の最大計数率が期待される。この 96 MHz と実際に Fig. 5 から得られた 38 MHz の差異については、現在原因を調査中であるが、SSPD の出力信号の繰り返し周期が短い場合、MC-DC/SFQ 変換器において変換誤動作（数え落とし）が発生している可能性があると考えている。MC-DC/SFQ 変換器は、入力信号の立ち上がりで SFQ パルスを発生し、立下りで内部状態がリセットして、次の入力信号を受け付け可能な状態となる。このリ

Fig. 4 Implementation of an 8-pixel SSPD array with an interleaved structure and 16-channel SFQ multiplexer circuit.

Fig. 5 Response count rate dependence of system detection efficiency.

セットするための電流レベルと入力感度はトレードオフの関係にあり、感度を追及するとリセット電流が非常に小さな値となり、入力パルスがほぼ 0 に戻らないと MC-DC/SFQ 変換器の内部状態がリセットしない。SSPD の出力電流は長くテールを引くため、通常の信号読み出しでは数え洩らさなかったパルスを SFQ パルスに変換する際には数え洩らしている可能性があると考えている。MC-DC/SFQ 変換器の入力感度の最適化も含めて、この問題を継続調査していく予定である。

3.2 SFQ エンコーダ回路

SFQ 信号処理が有用な応用としてイメージングシステム用のエンコーダ回路がある。我々は SFQ 信号処理の有用性を実証するため、64 ピクセル SSPD イメージングシステム

Fig. 6 (a) Block diagram of a 64-bit encoder circuit for a 64-pixel SSPD imaging system, and (b) its readout pulse sequence.

をマイルストーンとして研究開発に取り組んでいる。**Fig. 6**に我々が当初設計・評価に取り組んだ SFQ エンコーダ回路のブロック図と信号読み出しシーケンスを示す。各々のピクセルからの信号を T1 セルからなるパルスカウンタで計数し、その結果を 64 ビットシフトレジスタに書き込んだ後、外部からのクロック信号により室温に読み出す。読み出しに必要なケーブルは、パルスカウンタのリセット入力、クロック入力、信号読み出しのための 3 本である。この回路の特徴は、シフトレジスタから信号を読み出している間もパルスカウンタで入力信号を計数できるため、連続的に入射光子を検出できる点である。一方、入力信号はリセット信号により一旦レジスタに蓄えられるため、入射光子の時間情報はリセット入力のタイミングで量子化される。

我々はこの回路を設計・試作し、液体ヘリウムで評価したところ、全入力チャンネルが約±15%の動作マージンで動作することを確認した。しかしながら、この回路を 0.1 W GM 冷凍機に実装して評価したところ、サンプルステージ温度が上昇し、回路が動作しないことが判明した。この回路の駆動に必要なバイアス電流は 370 mA であり、回路のインピーダンスは 6.6 mΩ であることから、チップが発生するジュール熱は約 0.9 mW であり、冷凍機の冷却能力 0.1 W よりもはるかに小さい。しかしながら、5 mm 角というチップ上では局所的に温度が上昇している可能性が考えられる。

そこで、回路にバイアス電流を供給しながらチップ上のジョセフソン接合の電流-電圧特性を評価することで、チップ上の局所的な温度上昇を調べた。チップ上の温度は、観測されたジョセフソン接合のギャップ電圧から見積もった。その結果、370 mA のバイアス電流により、チップ上の温度は約 6.2 K 程度に上昇していることがわかった。こ

れがチップ上で何 W の発熱に相当するか見積もるため、チップ上のモリブデン薄膜で形成した約 700 Ω の抵抗に電流を供給しながら、同様にジョセフソン接合の電流-電圧特性からチップ温度を見積もったところ、約 6 mW のジュール熱に相当することがわかった。SFQ 回路そのものが発生するジュール熱は高々 0.9 mW のはずであるから、それ以外の発熱、バイアスケابلやパッケージのプリント基板配線、ボンディングワイヤで発生するジュール熱等が、チップ温度の局所的な上昇に寄与していることは明らかである。

このチップ上での局所的な温度上昇を抑制するためには、バイアス供給ケーブルを極力低抵抗化する、あるいはバイアスケابلの本数を増やすことが有効であるが、これらはケーブルを介した冷凍機への熱流入の増大につながるため、最適なケーブル材料、本数を見出す必要がある。そして何よりも SFQ 回路そのもののバイアス電流を低減することが重要である。

3.3 イベント駆動型 SFQ エンコーダ回路

64 ビット SFQ エンコーダ回路のバイアス電流を削減するため、回路設計の大幅な見直しを行った。**Fig. 7** に新たに設計した 64 ビット SFQ エンコーダ回路のブロック図を示す。**Fig. 7** において、SSPD0 から信号が入力された場合、アドレスデータとして SFQ パルス 1 個が出力されるの

Fig. 7 Block diagram of a 64-bit event-driven SFQ encoder circuit.

Fig. 8 Output waveform of a 64-bit event-driven SFQ encoder circuit connected with a 64-pixel SSPD array mounted on the same sample block.

に対して、SSPD63 から信号が入力された場合、64 個の SFQ パルスが出力される。このパルス数はパルスカウンターで 6 ビット ($2^6 = 64$) のコードに変換され、シフトレジスタに転送された後、クロック信号で外部に読み出される。ここで、シフトレジスタに蓄えられた情報を外部からのクロック信号で読み出すことも可能であるが、Fig. 7 では光子を検出したタイミングと同期して SFQ 回路内部でクロックを生成して読み出す方式をとっている。こうすることで、光子の入射した位置情報だけでなく時間情報も得られることから、Fig. 6 の回路とは差別化して、イベント駆動型 SFQ エンコーダ回路と呼んでいる。

実際に SFQ セルライブラリを用いてイベント駆動型エンコーダ回路を設計したところ、回路全体のジョセフソン接合数は 2550、駆動に必要なバイアス電流量は 270 mA 程度となり、3.2 で述べたエンコーダ回路の 370 mA と比べて大幅に削減することができた。我々はさらにバイアス電流を削減するため、回路を構成するジョセフソン伝送線路、パルスプリッタ、CB 等の SFQ セルの最小臨界電流値を、通常の 100 μ A から半分の 50 μ A とした SFQ セルを新たに設計し、それらを用いて回路を設計した結果、最終的にバイアス電流量を約 150 mA にまで低減することに成功した。

この回路を液体ヘリウム中で評価したところ、全入力チャンネルに対して正常動作を確認し、0.1 W GM 冷凍機中でも回路が正常に動作することを確認した。我々は、この回路を 64 ピクセル SSPD と同一のパッケージに実装・接続して、光信号入力に対する応答を調べた。Fig. 8 に得られた動作波形を示す。システムとしては非同期での動作が可能だが、今回の試験では繰り返し周波数 1 MHz のパルスレーザーを光源として、それに同期した出力信号として波形を観測した。パルスレーザーのトリガー出力と同期して、先頭に SSPD0 から SSPD63 のどれかに光子が入力したことを示す「1」(valid bit) が出力され、それに続いてアドレス情報を示す「010101」が Non-Return-Zero (NRZ) の信号フォーマットで出力されている。また、ビット列の最後が「1」の場合、NRZ 信号フォーマットでは次の光子検出信号の valid bit である「1」で出力電位が変わらないため検出できない。そこで、ビット列の最後に「0」を付加することで、valid bit の「1」を必ず検出できるようにしている。Fig. 8 から各ビットの時間間隔は 10 ns であり、イベント駆動型 SFQ エンコーダの内部で正常に 100 MHz のクロックが生成されていることがわかる。現在、イベント駆動型 SFQ エンコーダから外部に読み出した非同期出力信号を FPGA で信号処理してディスプレイ上に光子検出の位置情報を表示するシステム実証に向けて準備を進めている。

3.4 モノリシック集積化

SFQ 信号処理の究極的なゴールは、マルチピクセル SSPD とのモノリシック集積化である。我々は、16 ピクセル

Fig. 9 Microphotograph of a 64-bit SFQ multiplexer monolithically integrated with a 64-pixel SSPD array.

ル SSPD 及び 64 ピクセル SSPD と SFQ 多重化回路のモノリシック集積化を進めている。Fig. 9 に 64 ピクセル SSPD と SFQ 信号処理回路のモノリシック集積化チップの顕微鏡写真を示す。ここで、マルチピクセル SSPD は NICT で作製し、SFQ 回路についてはこれまで同様 AIST CAVITY が提供する Nb 2.5 kA/cm² 標準プロセスを用いて作製した。これまでに実際に 0.1 W GM 冷凍機に実装して測定・評価したのは主に 16 ピクセル SSPD で、モノリシックに集積化した SFQ 回路を介して SSPD からの光検出信号を読み出すことに成功している。しかしながら、現状で観測された検出効率は 0.25%程度と、通常の SSPD の検出効率 80%に比べて著しく低い値である。マルチピクセル SSPD を作製したのち、SFQ 回路を作製する過程（抵抗層のモリブデン薄膜の成膜過程）で、薄膜のストレスにより SSPD の光キャビティを構成する SiO 薄膜の一部に剥離が発生し、それに続くモリブデン抵抗層のエッチング工程で SSPD の配線の一部が消失し、一部のピクセルにアクセスできないことが、低い検出効率の原因と考えている。現在、薄膜の付着性を高めるため、熱蒸着で成膜する SiO に代わり、SiO₂ スパッタ膜を採用する等、作製プロセスの見直しを進めている。

4. 今後の展望

SSPD の高性能化に向けた SFQ 回路による極低温信号処理技術について、NICT におけるこれまでの取り組みを紹介した。SFQ 回路を用いることで、非常に高い時間精度での信号読み出しが可能であり、信号処理回路の規模としても約 2500 個のジョセフソン接合を含む 64 ピクセル SSPD 用のエンコーダ回路が 0.1 W GM 冷凍機で動作するところまできている。今後、実際にマルチピクセル SSPD と組み合わせ、SSPD の高速化（あるいは大面積化）を実証するとともに、本稿でも述べた SFQ エンコーダ回路を用いて、小規模のイメージングシステムの実証を進めていくことになる。

米国 MIT のグループでは、超伝導遅延線を用いたイメージングシステムを提案し、実効的に 590 ピクセルの動作を実証しているが³⁰⁾、遅延線を準平面型導波路 (CPW) で構成する必要があり、CPW の信号線で光子を検出することになるため、CPW のグランド部も含めると、高いフィリングファクタを実現することが難しい。従って、高い検出効率をこの手法で実現することは難しいと思われる。一方、米国 NIST のグループでは、 N^2 ピクセルの SSPD アレイに対して読み出しケーブル数を $2N$ に削減する読み出し手法を提案・実証しており、この読み出し手法による 64 ピクセル SSPD アレイのシステム動作実証にもすでに成功している³¹⁾。この手法では、多層配線の導入により高いフィリングファクタを実現できるため、高い検出効率の実現が可能であるが、 $2N$ 本の配線をどのように冷凍機に実装するかが課題である。すでに、64 ビット SFQ エンコーダ回路の 0.1 W GM 冷凍機での動作に成功しているが、NIST と同様の信号読み出し手法を採用したとすると、 N の値として 32 程度、 $32 \times 32 = 1024$ ピクセルの SSPD アレイを、現状の 64 ビット SFQ エンコーダ回路とほぼ同じ規模の SFQ 信号処理により実現でき、冷凍機からの信号読み出しケーブルを大幅に (1 本に) 削減することができると考えている。今後はこの 1024 ピクセル SSPD イメージングシステムを 1 つのマイルストーンとして研究開発に取り組んでいく予定である。

さらに大規模なマルチピクセル化を実現するには、SFQ 回路のさらなる低バイアス電流化が必要であるが、本稿でも述べたように、すでに臨界電流値を半分とした SFQ セルを導入しており、さらなるバイアス電流の削減には大きな困難を伴うことが予想される。断熱型量子磁束パラメトロン (Adiabatic Quantum Flux Parametron: AQFP) 等、大きな直流バイアス電流を必要としない、SFQ 回路よりもさらに低消費電力での動作が可能な新たな極低温信号処理技術の導入も視野に検討していく必要があると考えている³²⁾。

本研究の一部は科学研究費 (基盤研究 (A) No. 26249054) の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) G. 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.* **79** (2001) 705-707
- 2) C.M. Natarajan, M.G. Tanner and R.H. Hadfield: "Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications," *Supercond. Sci. Technol.* **25** (2012) 1-16
- 3) E.A. Dauler, M.E. Grein, A.J. Kerman, F. Marsili, S. Miki, S.W. Nam, M.D. Shaw, H. Terai, V.B. Verma and T. Yamashita: "Review of superconducting nanowire single-photon detector system design options and demonstrated performance," *Opt. Engineering* **53** (2014) 081907
- 4) F. Marsili, V. Verma, J. Stern, S. Harrington, A. Lita, T. Gerrits, I. Vayshenker, B. Baek, M. D. Shaw, R. P. Mirin and S. W. Nam: "Detecting single infrared photons with 93% system efficiency," *Nature Photonics* **7** (2013) 210-214
- 5) D. Rosenberg, A.J. Kerman, R.J. Molnar and E.A. Dauler: "High-speed and high-efficiency superconducting nanowire single photon detector array," *Opt. Express* **21** (2013) 1440-1447
- 6) S. Miki, T. Yamashita, H. Terai and Z. Wang: "High performance fiber-coupled NbTiN superconducting nanowire single photon detectors with Gifford-McMahon cryocooler," *Opt. Express* **21** (2013) 10208-10214
- 7) M. Sasaki, M. Fujiwara, H. Ishizuka, W. Klaus, K. Wakui, M. Takeoka, S. Miki, T. Yamashita, Z. Wang, A. Tanaka, K. Yoshino, Y. Nambu, S. Takahashi, A. Tajima, A. Tomita, T. Domeki, T. Hasegawa, Y. Sasaki, H. Kobayashi, T. Asai, K. Shimizu, T. Tokura, T. Tsurumaru, M. Matsui, T. Honjo, K. Tamaki, H. Takesue, Y. Tokura, J. F. Dynes, A. R. Dixon, A. W. Sharpe, Z. L. Yuan, A. J. Shields, S. Uchikoga, M. Legre, S. Robyr, P. Trinkler, L. Monat, J.-B. Page, G. Ribordy, A. Poppe, A. Allacher, O. Maurhart, T. Langer, M. Peev and A. Zeilinger: "Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network," *Opt. Express* **19** (2011) 10387
- 8) S. Miki, T. Yamashita, M. Fujiwara, M. Sasaki and Z. Wang: "Multichannel SNSPD system with high detection efficiency at telecommunication wavelength," *Opt. Lett.* **35** (2010) 2133-2135
- 9) T. Yamashita, D. Liu, S. Miki, J. Yamamoto, T. Haraguchi, M. Kinjo, Y. Hiraoka, Z. Wang and H. Terai: "Fluorescence correlation spectroscopy with visible-wavelength superconducting nanowire single-photon detector," *Opt. Express* **22** (2014) 28783
- 10) J. Yamamoto, M. Oura, T. Yamashita, S. Miki, T. Jin, T. Haraguchi, Y. Hiraoka, H. Terai and M. Kinjo: "Rotational diffusion measurement using superconductive single photon detectors based on polarization-dependent fluorescence correlation spectroscopy," *Opt. Express* **23** (2015) 32633
- 11) E.A. Dauler, B.S. Robinson, A.J. Kerman, J.K. W. Yang, K.M. Rosfjord, V. Anant, B. Voronov, G. Gol'tsman and K.K. Berggren: "Multi-element superconducting nanowire single-photon detector," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 279-284
- 12) H. Terai, S. Miki and Z. Wang: "Readout electronics using single-flux-quantum circuit technology for superconducting single-photon detector array," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) 350-353
- 13) H. Terai, S. Miki, T. Yamashita, K. Makise and Z. Wang: "Demonstration of single-flux-quantum readout operation for superconducting single-photon detectors," *Appl. Phys. Lett.* **97** (2010) 112510
- 14) S. Miki, H. Terai, T. Yamashita, K. Makise, M. Fujiwara, M. Sasaki and Z. Wang: "Superconducting single photon detectors integrated with single flux quantum readout circuits in a cryocooler," *Appl. Phys. Lett.* **99** (2011) 111108
- 15) T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise and Z. Wang: "Crosstalk-free operation of multielement superconducting nanowire single-photon detector array integrated with single-flux-quantum circuit in a 0.1 W Gifford McMahon cryocooler," *Opt. Lett.* **37** (2012) 2982-2984

- 16) H. Terai, T. Yamashita, S. Miki, K. Makise and Z. Wang: "Low-jitter single flux quantum signal readout from superconducting single photon detector," *Opt. Express* **20** (2012) 20115-20123
- 17) T. Ortlev, M. Hofherr, L. Fritzsche, S. Engert, K. Ilin, D. Rall, H. Toepfer, H.-G. Meyer and M. Siegel: "Demonstration of digital readout circuit for superconducting nanowire single photon detector," *Opt. Express* **19** (2011) 18593-18601
- 18) H. Myoren, S. Takeda, M. Naruse, T. Taino, J. Chen and P. Wu: "Single-flux quantum readout circuits for photon-number-resolving superconducting nanowire single-photon detectors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** (2015) 2200204-2200207
- 19) 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.* **1** (1991) 3-28
- 20) M. Tanaka, T. Kawamoto, Y. Yamanashi, Y. Kamiya, A. Akimoto, K. Fujiwara, A. Fujimaki, N. Yoshikawa, H. Terai and S. Yorozu: "Design of a pipelined 8-bit-serial single-flux-quantum microprocessor with multiple ALUs," *Supercond. Sci. Technol.* **19** (2006) 344-348
- 21) S. Nagasawa, Y. Hashimoto, H. Numata and S. Tahara: "A 380 ps, 9.5 mW Josephson 4-Kbit RAM operated at a high bit yield," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (1995) 2447-2450
- 22) L. You, X. Yang, Y. He, W. Zhang, D. Liu, W. Zhang, L. Zhang, X. Liu, S. Chen, Z. Wang and X. Xie: "Jitter analysis of a superconducting nanowire single photon detector," *AIP Advances* **3** (2013) 072135
- 23) T. Ortlev and F. H. Uhlmann: "Technology related timing jitter in superconducting electronics," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 534-537
- 24) S. Miyajima, M. Yabuno, T. Yamashita, S. Miki and H. Terai: "Timing jitter evaluation of single flux quantum based timing discriminator toward high time-resolution photon detector," *IEICE Technical Report SCE 2017-5* (2017) 23-29
宮嶋茂之、藪野正裕、山下太郎、三木茂人、寺井弘高:「高時間精度光子検出に向けた単一磁束量子時間弁別器のタイミングジッタ評価」、信学技報 **117** (10) (2017) 23-29
- 25) I.E. Zadeh, J.W.N. Los, R.B.M. Gourgues, V. Steinmetz, S.M. Dobrovolskiy, V. Zwiller and S.N. Dorenbos: "Single-photon detectors combining near unity efficiency, ultra-high detection-rates, and ultra-high time resolution," *arXiv:1611.02726v1* (2016)
- 26) A. McCarthy, N.J. Krichel, N.R. Gemmell, X. Ren, M.G. Tanner, S.N. Dorenbos, V. Zwiller, R.H. Hadfield and G.S. Buller: "Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detection," *Opt. Express* **21** (2013) 8904-8915
- 27) T. Kobayashi, R. Ikuta, S. Yasui, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, T. Yamamoto, M. Koashi and N. Imoto: "Frequency-domain Hong-Ou-Mandel interference," *Nature Photonics* **10** (2016) 441-444
- 28) A. Divochiy, F. Marsili, D. Bitauld, A. Gaggero, R. Leoni, F. Mattioli, A. Korneev, V. Seleznev, N. Kaurova, O. Minaeva, G. Gol'tsman, K.G. Lagoudakis, M. Benkhaoul, F. Lévy and A. Fiore: "Superconducting nanowire photon number-resolving detector at telecommunication wavelengths," *Nature Photonics* **2** (2008) 302-306
- 29) S. Yorozu, Y. Kameda, H. Terai, A. Fujimaki, T. Yamada and S. Tahara: "A single flux quantum standard logic cell library," *Physica C* **378** (2002) 1471-1474
- 30) Q. Zhao, D. Zhu, N. Calandri, A.E. Dane, A.N. McCaughan, F. Bellei, H. Wang, D.F. Santavica and K.K. Berggren: "Single-photon imager based on a superconducting nanowire delay line," *Nature Photonics* **11** (2017) 247-252
- 31) M.S. Allman, V.B. Verma, M. Stevens, T. Gerrits, R.D. Horansky, A.E. Lita, F. Marsili, A. Beye, M.D. Shaw, D. Kumo, R. Mirin and S.W. Nam: "A near-infrared 64-pixel superconducting nanowire single photon detector array with integrated multiplexed readout," *Appl. Phys. Lett.* **106** (2015) 192601
- 32) N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa: "An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device," *Supercond. Sci. Technol.* **26** (2013) 35010-35014

寺井 弘 高

1967 年 7 月 16 日生。1991 年名古屋大学工学部電気・電子工学科卒業。1996 年同大学院工学研究科博士後期課程（電子工学専攻）修了。1996 年日本電気(株)基礎研究所勤務。超伝導デバイス開発に従事。1997 年より旧郵政省通信総合研究所入所。現在、独立行政法人情報通信研究機構、未来 ICT 研究所、フロンティア創造総合研究室、上席研究員。大阪府立大学客員教授兼務。主に超伝導単一磁束量子回路の研究開発に従事。応用物理学会、電子情報通信学会会員。工学博士。

三 木 茂 人

1975 年 6 月 4 日生。1998 年神戸大・工・情報卒。2003 年同大学院自然科学研究科博士課程了。同年、科学技術研究機構研究員。2005 年（独）情報通信研究機構入所。現在、同機構未来 ICT 研究所フロンティア創造総合研究室主任研究員。2016 年より神戸大学大学院工学研究科客員准教授兼務。主に超伝導単一光子検出器に関する研究に従事。応用物理学会、電子情報通信学会会員。工学博士。

山 下 太 郎

1978 年 2 月 16 日生。2000 年東北大学理学部物理学科卒業。2005 年同大学院理学研究科博士後期課程（物理学専攻）修了。2004～2006 年日本学術振興会特別研究員。2009 年より（独）情報通信研究機構勤務。2016 年より JST さきがけ研究者（兼任）。主に超伝導デバイスの研究開発に従事。応用物理学会、電子情報通信学会、日本物理学会、米国物理学会会員。博士（理学）。

宮 嶋 茂 之

1983 年 7 月 23 日生。2007 年名古屋大学工学部 電気電子・情報工学科卒業。2013 年同大学院工学研究科 量子工学専攻 博士後期課程修了。2013 年大阪府立大学工学研究科 特認助教着任。超伝導デバイスによるイメージングシステムの開発に従事。2015 年国立研究開発法人 情報通信研究機構入所。現在、国立研究開発法人情報通信研究機構 未来

ICT 研究所 フロンティア創造総合研究室 研究員。主に超伝導単一磁束量子回路の研究開発に従事。応用物理学会，電子情報通信学会会員。工学博士。

藪 野 正 裕

1983 年 6 月 25 日生。2007 年東北大学工学部電気情報・物理工学科卒業。2012 年同大学院工学研究科博士後期課程（電子工学専攻）修了。2012 年東北大学電気通信研究所、博士研究員。量子光学の研究に従事。2016 年独立行政法人情報通信研究機構、未来 ICT 研究所、フロンティア創造総合研究室、研究員。超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の研究開発に従事。応用物理学会会員。工学博士。