

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249054

研究課題名(和文)大規模SSPDアレイによるシングルフォトンイメージング技術の創出

研究課題名(英文)Development of single-photon imaging technology based on large-scale SSPD array

研究代表者

寺井 弘高 (TERAI, HIROTAKA)

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・上席研究員

研究者番号：10359094

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,600,000円

研究成果の概要(和文)：可視から赤外の波長領域で光子計数が可能な究極の感度を持つイメージセンサの実現を目指して、超伝導単一光子検出器(SSPD)の大規模アレイ化に向けた基盤技術を開発した。単一磁束量子(SFQ)回路を用いて光子を検出したピクセルのアドレス情報をデジタル信号として出力するエンコーダ回路を設計・評価し、64ピクセルSSPDアレイを信号処理回路と組み合わせて動作実証した。また、配線数を削減する新たな読み出し手法や、SFQ回路よりもさらに低消費電力動作が可能な断熱型磁束量子パラメトロン(AQFP)回路の導入についても検討し、原理実証に成功した。

研究成果の概要(英文)：We developed a fundamental technology for large-scale array of superconducting nanowire single-photon detector (SSPD) with the aim of realizing image sensor with the ultimate sensitivity capable of photon counting in the visible to infrared wavelength range. We designed and tested an encoder circuit based on a single flux quantum (SFQ) circuit that can output a digital code representing address information of pixels that detected photons. We successfully demonstrated the operation of a 64-pixel SSPD array with a signal processing circuit. We also examined a new readout scheme that enables us to reduce the number of wiring to extract the signal from the SSPD array and the introduction of an adiabatic flux quantum parametron (AQFP) circuit that can operate even lower power consumption than the SFQ circuit.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：電子デバイス 光子検出器 超伝導集積回路

1. 研究開始当初の背景

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD) は、高検出感度、低暗計数率、高計数率、低ジッタ、広波長帯域という優れた特長を有し、世界中で活発な研究が行われている。現在、SSPD の検出感度は 1550 nm の光波長に対して 93% に達し、黒体放射による迷光を遮蔽すれば、暗計数率もほぼゼロであり、究極の感度と低ノイズ性を有している [1]。我々のグループでも、冷却能力 0.1 W の小型 GM 冷凍機に 6 個の SSPD を実装した SSPD システムの開発に成功し、システム検出効率として 67% を達成している [2]。このシステムは、100 V 交流電源による駆動が可能、液体ヘリウム等の冷媒の供給を必要とせず、どこでも連続運転でき、すでに東京 QKD ネットワークをはじめとする量子情報分野における様々な実証実験や最先端の量子光学研究で使用されている。

SSPD を多ピクセル化することで、さらなる高速応答、光子数識別、イメージングが可能となるため、世界中の研究者がその開発に凌ぎを削っている。SSPD を多ピクセル化する上で問題となるのが、室温に信号を取り出すための同軸ケーブルを介した冷凍機への熱流入である。我々のグループでは、この問題を解決するため、世界に先駆けて単一磁束量子 (Single Flux Quantum: SFQ) 論理回路を用いた極低温環境下での SSPD 後段信号処理を提案し、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ている [3]。この極低温信号処理技術をさらに発展させることで、フォトンカウンティングレベルの感度を持つ大規模アレイフォーマットの SSPD イメージセンサの実現が可能と考えられ、そのようなセンサを実現できれば、量子情報通信のみならず、最先端の量子光学、バイオ研究など、幅広い分野で大きな威力を発揮し、新現象の発見、革新的技術の創出に大きく貢献することが期待される。

2. 研究の目的

これまでの SFQ 回路を用いた極低温信号処理の研究開発から、大規模 SSPD イメージセンサの実現に向けて、いくつかの克服すべき研究課題が明らかとなってきている。

- (1) 光子を検出したピクセルのアドレス情報をデジタル信号として出力する機能を有する信号処理回路 (エンコーダ回路) の開発および SSPD アレイと組み合わせた動作実証。
- (2) ピクセル数の増大に伴う信号配線数の増大および実装の煩雑さの増大
- (3) SFQ 信号処理回路の大規模化に伴う発熱の増大および SFQ 回路の駆動に必要な直

流電流による冷凍機内配線のジュール熱の増大。

本研究は、以上の課題について検討を行い、それらを克服するための基盤技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、(1) の課題について、SSPD イメージセンサを実現するため、これまでの信号多重化機能だけでなく、光子を検出したピクセルのアドレス情報をデジタル信号として出力する機能を持つ信号処理回路 (エンコーダ回路) を設計・評価する。SFQ 回路の作製には産業技術総合研究所の CRAVITY によるニオブ (Nb) ファンドライバサービスを利用する。試作・動作確認した回路については、SSPD アレイと同一の Gifford McMahon (GM) 冷凍機に実装し、信号読み出し動作を実証する。

(2) の課題については、SSPD アレイのピクセル数が増大すると、SFQ 回路による極低温信号処理を導入したとしても、配線数が膨大な数となるため、SSPD アレイと SFQ 信号処理回路を接続 (結線) すること自体が難しくなる。そこで本研究では、大規模 SSPD アレイからの信号読み出し配線を削減するために、1 つ 1 つのピクセルからではなく、アレイフォーマットの行と列から信号を取り出す新たな読み出し手法を検討する。また、実装をより容易にするため、SSPD アレイと SFQ 信号処理回路の同一ウェハ上へのモノリシック集積化についても検討する。

(3) の課題は、大規模 SSPD アレイを実現する上での最大の懸念事項である。SFQ 回路を駆動するためには、直流のバイアス電流供給が必要で、10,000 個のジョセフソン接合を含む SFQ 回路では、約 1 A の直流電流が必要である。SFQ 回路自体が発生するジュール熱も深刻化するが、冷凍機内のバイアス線が発生するジュール熱も無視できない。仮にバイアス線の抵抗が 10 mΩ であったとしても、バイアス配線が発生するジュール熱は 10 mW にもなるため、冷凍機温度を SSPD の動作に必要な 3 K 以下に保持することは難しいと考えられる。そこで本研究では、回路規模によらず 2 mA 程度の交流バイアス電流で駆動でき、電力消費も SFQ 回路のさらに 1/100 と小さい断熱型磁束量子パラメトロン (AQFP) 回路の導入を検討し [4]、SSPD と AQFP 回路を接続した信号読み出しの動作実証を行う。

4. 研究成果

以下、研究方法の内容に沿って研究成果を記述する。

- (1) イベント駆動型 SFQ エンコーダの設計・評価および SSPD アレイとの接続試験

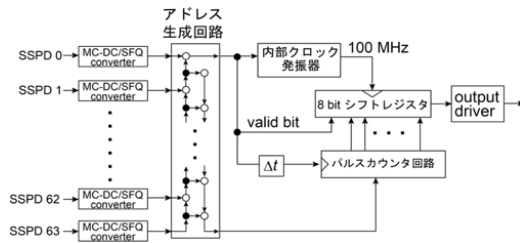


図1 イベント駆動型 64 ビット SFQ エンコーダの回路構成

まず、光子を検出したアドレス情報をデジタル出力するエンコーダ回路について、図1に本研究で設計した 64 ビット SFQ エンコーダ回路のブロック図を示す。図1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 ($2^6 = 64$) のデジタルコードに変換され、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。この回路では光子を検出したタイミングと同期して SFQ エンコーダ回路内部でクロックを生成して読み出す方式を採用しており、光子の入射した位置情報だけでなく時間情報も同時に得られることから、イベント駆動型 SFQ エンコーダ回路と呼ぶことにする。

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、回路の駆動に必要なバイアス電流量は 270 mA であったが、この電流量では回路そのものだけでなく、冷凍機内のバイアス線からのジュール熱による、試料ステージの温度上昇が問題となった。そこで、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、パルス分岐 (Splitter)、パルス合流 (Confluence Buffer: 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構成した結果、最終的にバイアス電流量を約 150 mA にまで低減することができた。

この回路の全入力チャンネルの正常動作を液体ヘリウム中で確認した後、0.1 ワット GM 冷凍機中でも回路が正常に動作することを確認できた。我々は、この回路を 64 ピクセル SSPD アレイと同一パッケージに実装・接続して、光信号入力に対する応答を調べた。図2に実証実験における SSPD アレイと SFQ 信号処理回路の実装の様子を、図3に観測された動作波形の一例を示す。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

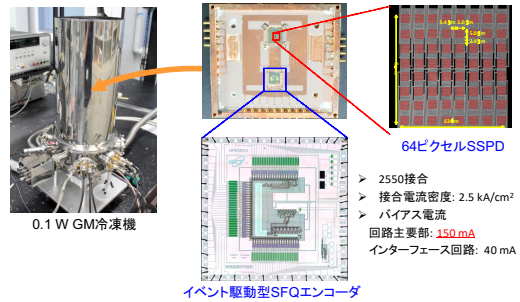


図2 64 ピクセル SSPD アレイとイベント駆動型 SFQ エンコーダ回路の GM 冷凍機への実装

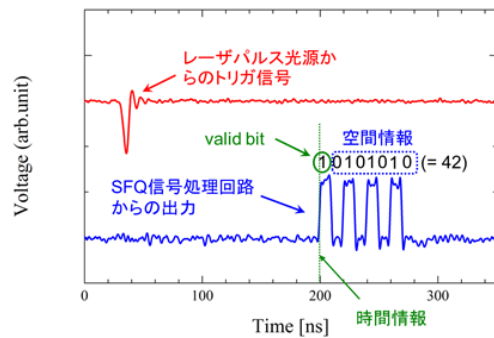


図3 64 ピクセル SSPD アレイの動作実証で観測された出力波形

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。図3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 100 MHz のクロックが正常に生成されていることが確認された。以上から、64 ピクセル SSPD アレイからの SFQ エンコーダを通した正常な信号読み出しが実証された。

(2) SSPD アレイからの行列信号読み出し方式の検討

研究方法でも述べたように、SSPD アレイのピクセル数が増大すると、SFQ 回路による極低温信号処理を導入したとしても、配線数が膨大な数となるため、SSPD アレイと SFQ 信号処理回路を接続 (結線) すること自体が困難となる。そこで、1つ1つのピクセルからではなく、アレイフォーマットの行と列から信号を取り出す新たな読み出し方式を検討した。図4に検討したアレイ構成を示す。この

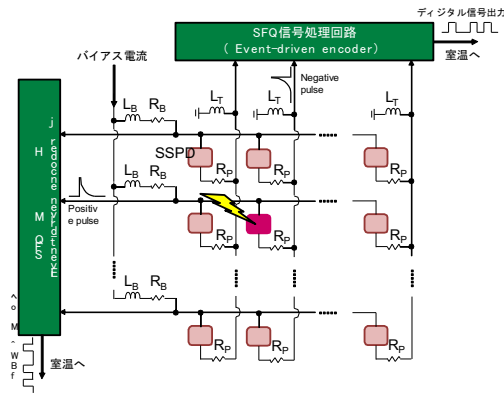


図4 行列(2N)読み出し方式によるSSPDアレイ構成

構成自体は米国 NIST のグループが提案したもので、この構成で 8x8 ピクセルの SSPD アレイが動作実証されているが[5]、これをさらに大規模にするためには図4に示すように、行と列からの出力信号をさらに極低温環境で信号処理をして室温に取り出すことが有効である。我々は、64ビットSFQエンコーダの動作をすでに実証しており、この回路を2分割しただけのほぼ同等規模の回路で、32x32ピクセルSSPDアレイ用の信号処理回路を実現できると考えられる。従って、図4に示す構成を採用し、さらにSFQ信号処理を導入することで、千ピクセル規模のSSPDアレイの実現も十分に視野に入ってくるものと思われる。

問題は大規模 SSPD アレイの作製手法である。図4に示す構成を実現するためには、少なくともバイアスをフィードするための抵抗層とナノワイヤを作り込み、なおかつ行と列の配線を交差させるための多層配線プロセスを実現しなければならない。図5に本研究で我々が作製した 32x32 ピクセル SSPD アレイのチップ写真とピクセル構成を示す。列配線はナノワイヤと同じ NbTiN 超薄膜で作製し、それと交差する行配線は SiO₂ 層間絶縁膜を介して同じく NbTiN 薄膜で構成した。また、ナノワイヤと隣接してバイアスフィード用の抵抗層 (Pd 薄膜) を作製した。32x32 ピクセルのすべてをテストするには少なくとも 32x2=64 本の配線が必要であるが、冷凍機から取り出すことのできる配線数は 10 本程度であるため、行出力と列出力をそれぞれ 2 チャンネルずつ任意に結線して、アレイ全体に光照射した状態で出力波形を観察した。その結果、ピクセルが応答したことを示す、極性のことなる出力パルスが行と列のそれぞれから観測され、期待した動作原理で動作していることを確認した(図6)。今後、32x32 ピクセル SSPD の完全動作を実証するためには、冷凍機から取り出すことのできる配線数が限られているため、SFQ 信号処理回路と組み

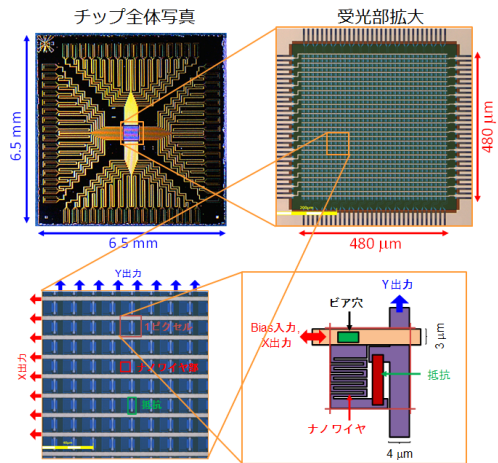


図5 32x32 ピクセル SSPD アレイの試作チップ写真とピクセル構成

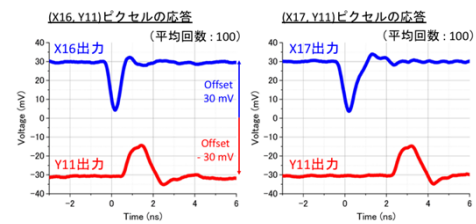


図6 32x32 ピクセル SSPD アレイの動作出力波形

合わせて動作を実証していくことになる。一方、SSPDアレイとSFQ信号処理回路の実装をより容易にするため、モノリシック集積化についても検討した。図7に作製したデバイスの断面構造とチップ写真を示す。今回、作製と動作実証を試みたのは 16 および 64 ピクセル SSPD アレイで、SFQ 信号処理回路としては単純な多重化回路とした。まず、情報通信研究機構で 260 nm の熱酸化膜付きのシリコン基板上に SSPD アレイを作製した。プロセスは単ピクセルの SSPD とほぼ同じで、詳細な説明は割愛するが、基板裏面からの光子入射を想定しており、ナノワイヤ上に光吸収効率を高めるための誘電体層 (SiO₂ 蒸着膜) と金属反射層 (Ti/Au) が積層されている。SSPD アレイを作製後のウェハは産業技術総合研究所に持ち込まれ、Nb 標準プロセスによ

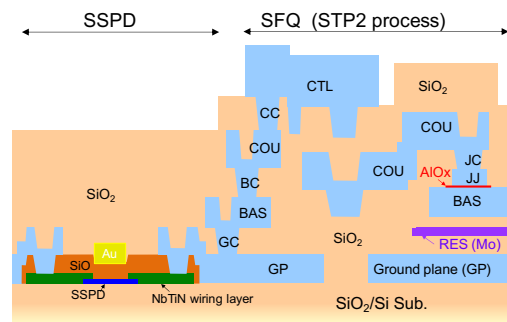


図7 SSPDアレイとSFQ信号処理のモノリシック集積化回路の断面構造

り同一ウェハ上に SFQ 回路を作製した。

我々は SFQ 回路をモノリシックに集積化した 16 ピクセル SSPD アレイにおいて検出効率・暗計数率のバイアス電流依存性を評価し、同一チップ上に集積化した SFQ 多重化回路を介して信号を読み出し、検出効率を測定することに成功した。しかしながら、得られた検出効率は 0.25% 程度と、単ピクセルの 80% と比較して著しく低い値であった。SFQ 回路作製プロセスにおいて SSPD の光キャビティを構成している SiO 層から膜剥がれが発生した。そのため、SiO 層下部の NbTiN 配線層の一部が消失し、大半のピクセルに外部からアクセスできないことが原因と考えている。今後、SiO 層の付着性の改善等、作製プロセスの改善が必要である。

(3) AQFP 回路を用いた SSPD からの信号読み出しの実証

SSPD アレイが大規模化すると SFQ 回路自体が発生するジュール熱も深刻化するが、冷凍機内のバイアス線が発生するジュール熱も無視できない。本研究で 64 ビット SFQ エンコーダ回路を 0.1 ワット GM 冷凍機で動作させることに成功しているが、さらに 10 倍、100 倍の回路規模となった場合には、バイアス電流による回路、配線からのジュール熱により冷凍機での動作が困難であることは、これまでの研究から明らかである。そこで、回路規模によらず 2 mA 程度の交流バイアス電流で駆動でき、電力消費も SFQ 回路のさらに 1/100 と小さい AQFP 回路の導入を検討した。AQFP 回路は、後藤英一氏が考案した磁束量子パラメトロン回路を断熱的に動作させることで、ランダウアー限界を超える超低消費エネルギーで論理演算を行うことができる回路技術である。詳細な動作原理は参考文献 4 に譲るが、本研究ではこの AQFP 回路を SSPD と接続して、信号の読み出しテストを行った。

図 8 に今回行った実験のセットアップを示す。SSPD と AQFP 回路を別々の冷凍機にインストールし、冷凍機外部でバイアスティーを介してケーブル接続した。AQFP 回路の駆動には多相の交流電流バイアスが必要で、今回の実験では 90° 位相の異なる 4 相のサイン波を印加した。交流バイアスの周波数は 100 MHz としたが、10 ns の時間間隔であれば SSPD の出力パルスの時間幅よりも小さいため、SSPD の出力パルスが立ち上がっている間に磁束量子を生成することが可能である。図 9 に出力パルスカウント数のパルス当たりの入射光子数依存性を示す。AQFP 回路を接続した場合と、接続していない場合を重ねてプロットしているが、ほぼ同一の曲線を描いているこ

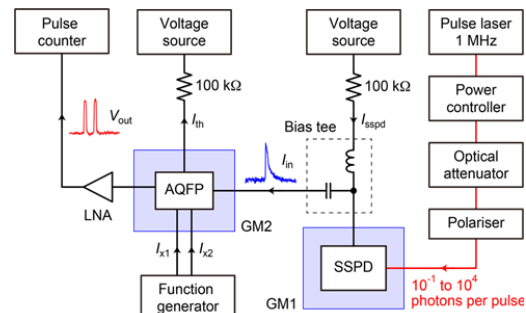


図 8 SSPD からの AQFP 回路による信号読み出し実証実験のセットアップ

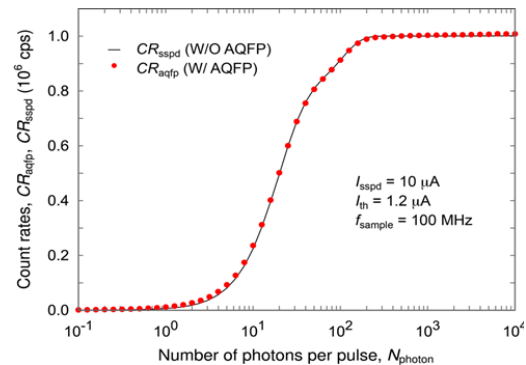


図 9 出力パルスカウント数のパルス当たりの光子数依存性

とがわかる。以上から、AQFP 回路により SSPD からの出力信号をもれなく磁束量子に変換し読み出すことができていることが確認され、SSPD から AQFP 回路を介して信号を読み出すことが可能であることを実証した [6]。

(4) 今後の展望

以上、大規模 SSPD アレイの実現に向けた主に 3 つの課題について検討を行い、それらの課題を克服するための基盤技術を確立した。本研究により、少なくとも千 (32x32) ピクセル規模の SSPD アレイの実現は十分視野に入ってきたと考えている。また、AQFP 回路の導入により、さらに大規模な 1 万ピクセル規模の SSPD アレイの実現も可能になるものと考えられる。一方で、歩留まり、特性均一性の改善も含めて、SSPD アレイの作製技術のさらなる成熟は不可欠となるだろう。また、最終的な完成形としては SSPD アレイと SFQ 回路をモノリシックに集積化する作製プロセス開発も不可欠となるだろう。

参考文献

[1] F. Marsili *et al.*, Nature Photonics **7** (2013) 210-214.
 [2] S. Miki, T. Yamashita, H. Terai and Z. Wang, Opt. Express **21** (2013) 10208-10214.
 [3] T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise and Z. Wang, Opt. Lett. **37** (14) (2012) 2982-2984.

[4] N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa, *Supercond. Sci. Technol.* **26** (2013) 35010–35014.

[5] M. S. Allman *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **106** (2015) 192601.

[6] N. Takeuchi, S. Miyajima, S. Miki, N. Yoshikawa and H. Terai, *Opt. Exp.* **25** (2017) 32650–32658.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① N. Takeuchi, T. Yamashita, S. Miyajima, S. Miki, N. Yoshikawa, and H. Terai, “Adiabatic quantum-flux-parameteron interface for the readout of superconducting nanowire single-photon detectors,” *Optics Express* 25, 2017, 32650 (査読あり)
<https://doi.org/10.1364/OE.25.032650>
- ② S. Miyajima, S. Miki, M. Yabuno, T. Yamashita, and H. Terai, “Timing discriminator based on single-flux-quantum circuit toward high time-resolved photon detection,” *Superconductor Science and Technology* 30, 2017, 12LT01 (査読あり)
<https://doi.org/10.1088/1361-6668/a926e>

[学会発表] (計 32 件)

*以下代表的なものを記す。

- ① H. Terai, S. Miki, T. Yamashita, S. Miyajima, M. Yabuno, The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition (OFC2018), “Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors for Future Optical Communications,” 2018 年 3 月 12 日, San Diego, USA. (招待講演)
- ② H. Terai, S. Miyajima, M. Yabuno, T. Yamashita, S. Miki, S. Nagawsawa, and M. Hidaka, “Multi-pixel superconducting nanowire single-photon detectors with cryogenic signal processors using single-flux-quantum circuits,” *Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Material Conference (CEC/ICMC 2017)*, 2017 年 7 月 12 日, Madison, WI, USA. (招待講演)
- ③ H. Terai, K. Makise, T. Yamashita, S. Miki, and Z. Wang, “Design and testing of SFQ signal processor for 64-pixel SSPD array,” *Applied Superconductivity Conference*,

2014 年 8 月 10 日、Charlotte, NC, USA.

○出願状況 (計 1 件)

名称：超伝導単一光子検出器
発明者：三木茂人、寺井弘高、山下太郎
権利者：国立研究開発法人 情報通信研究機構
種類：公開特許
番号：P2016-212995
出願年月日：2016 年 10 月 31 日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者
寺井 弘高 (TERAI, Hirotaka)
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
研究者番号：10359094

(2) 研究分担者
竹内 尚輝 (TAKEUCHI, Naoki)
横浜国立大学・先端科学高等研究員・特任教員 (准教授)
研究者番号：00746472

(3) 研究分担者
日高 睦夫 (HIDAKA, Mutsuo)
産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス部門・製造領域・招聘研究員
研究者番号：20500672

(4) 研究分担者
三木 茂人 (MIKI, Shigehito)
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・主任研究員
研究者番号：30398424

(5) 研究分担者
宮嶋 茂之 (MIYAJIMA, Shigeyuki)
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
研究者番号：50708055

(6) 研究分担者
山下 太郎 (YAMASHITA, Taro)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60567254