

機関番号：82636

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360165

研究課題名 (和文) 単一磁束量子デジタル信号処理による超伝導ナノワイヤ光子検出器
高性能化の研究研究課題名 (英文) High performance superconducting nanowire single-photon detector
using single-flux-quantum digital signal processing

研究代表者

寺井 弘高 (TERAI HIROTAKA)

独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究センター ナノ ICT グループ・主任研究員
研究者番号：10359094

研究成果の概要 (和文)：超伝導単一光子検出器 (SSPD) アレーを実現するために、単一磁束量子 (SFQ) による信号処理を提案し、SSPD と SFQ 回路を実際に接続して性能評価を行った。SSPD の出力信号から SFQ パルスへの変換動作が 10^{-5} 以下のエラーレートで行われていることを確認し、SFQ 読み出し回路を接続することによる、SSPD の検出効率カーブへの影響がほとんどないことを実証した。

研究成果の概要 (英文)：A readout circuit using superconducting single-flux-quantum (SFQ) circuits was proposed to realize an independently addressable array of superconducting single-photon detectors (SSPDs). We designed an SSPD/SFQ interface circuit and tested it by connecting with SSPDs. The error rates of SFQ readout circuits were found to be below 10^{-5} and the connection of the SFQ readout circuit does not affect the detection efficiency curve observed in the SSPD.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2009年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2010年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス、集積回路、超伝導光子検出器

1. 研究開始当初の背景

電子マネー等の普及により、これまでの「高速・大容量」に加えて、「安全」というキーワードが情報通信分野において重要性を増している。このような背景のもと、光子1個を情報担体とすることにより、絶対安全性が保証される量子暗号通信の研究が活発化している。量子暗号通信において、そのシステム性能を大きく左右するキーデバイスは、光子検出器である。高量子効率、高速性に加えて、低暗計数率であることが求められ

る。表1に各種光子検出器の性能をまとめた。超伝導転移端型 (TES) と超伝導ナノワイヤ型単一光子検出器 (SSPD) が、超伝導現象を利用した光子検出器で、通信波長帯 (1550 nm) に感度を持ち、高量子効率、低暗計数率という特長を持つ [1-3]。とりわけ、SNSPD は高速性にも優れ、100 MHz 以上というあらゆる光子検出器の中で、最も高い最大計数率を誇っている。また、動作温度が比較的高く、小型で簡便な GM 冷凍機 (冷却能力 0.1 W 程度) で動作するのも大きな特長である。

我々は、これまで SSPD の開発を行い[4]、すでに NbN 極薄膜形成技術、100 nm 以下の細線加工技術を確立し、量子鍵配布フィールド試験での動作実証にも成功している。この SSPD をアレー化することで、さらなる高性能化を目指す研究が近年注目を集めている[5]。アレー化する利点は2つある。1つは、受光面積の縮小による高速化である。SSPD は非常に長い超伝導細線であるため、素子のインダクタンス L が大きい。そのため、動作速度は負荷抵抗 R (50 Ω) との比 L/R 時定数で決まる。高速化のためには、細線長の短縮、受光面積の縮小が不可欠である。通常、SSPD の受光面積は、ファイバとの十分な結合効率を得るため $10 \sim 15 \mu\text{m}^2$ としている。アレー化により、ファイバとの十分な結合効率を確保しつつ、各ピクセルの受光面積を縮小することで、高速化が期待できるのである。もう1つの利点は、位置の異なるピクセルに同時入射した光子を検出することで、実質的に光子数の識別が可能となる点である。光子カウンティング可能な感度と超高速なフレームレートを兼ね備えたイメージングセンサとして、量子情報通信のみならず、最先端の量子光学や、バイオ研究など、様々な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

SSPD のアレー化を実現する上での最大の障害は出力信号処理である。アレー化による高速化で、SSPD からの出力信号は GHz 帯域となる。従って、熱伝導率の大きい広帯域な同軸ケーブルにより出力信号を取り出す必要があるが、アレー化により出力線数が増加するため、小型 GM 冷凍機への実装はきわめて困難となることが予想される。そこで、我々は単一磁束量子 (Single-Flux-Quantum: SFQ) 回路による信号処理の導入を提案する。SFQ 回路は、高速かつ超低消費電力での動作が可能である[6]。我々はこれまでの研究で、ジョセフソン接合 1 万個規模の SFQ 回路が、40 GHz 以上のクロック周波数で動作することを実証している。SSPD からの出力パルスを、うまく SFQ パルスに変換することができれば、SFQ 回路により様々な信号処理を行うことが可能である。接合数 1 万個規模の SFQ 回路が消費する電力は、高々 $2 \sim 4 \text{ mW}$ である。従って、将来的に接合数 10 万個以上からなる回路でも、小型 GM 冷凍機に実装できる。本研究は、SSPD のアレー化による高速化、光子数識別の実現を念頭に置き、SSPD と SFQ デジタル信号処理技術を融合するための SSPD/SFQ インターフェース等の基盤技術の確立を目的とする。

3. 研究の方法

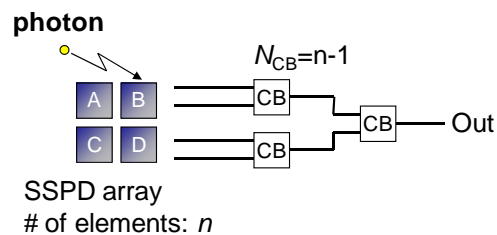
以下の手順で研究を進めた。

- (1) 量子鍵配布 (QKD) システム用及びイメージングセンサ用の 2 つの応用を想定した信号処理回路の設計を行い、必要なジョセフソン接合数を見積もった。現状技術 (ジョセフソン接合数 10,000 個程度) で実現できる SSPD アレーシステムの規模、性能について検討を行った。
- (2) SFQ 回路を SSPD の出力信号処理に用いる際の要となる SSPD/SFQ インターフェース回路の設計・評価を行った。設計した回路は SRL 2.5 kA/cm² Nb 標準プロセスにより作製し[7]、パルス発生器を用いて外部から信号を入力し、入力信号感度等の評価を行った。
- (3) (2) で設計・評価した SSPD/SFQ インターフェース回路と出力ドライバからなる SFQ 読み出し回路を SSPD と接続して、エラーレート、検出効率の測定を行った。

4. 研究成果

以下、研究の方法に従って、得られた成果を述べる。

(a)



(b)

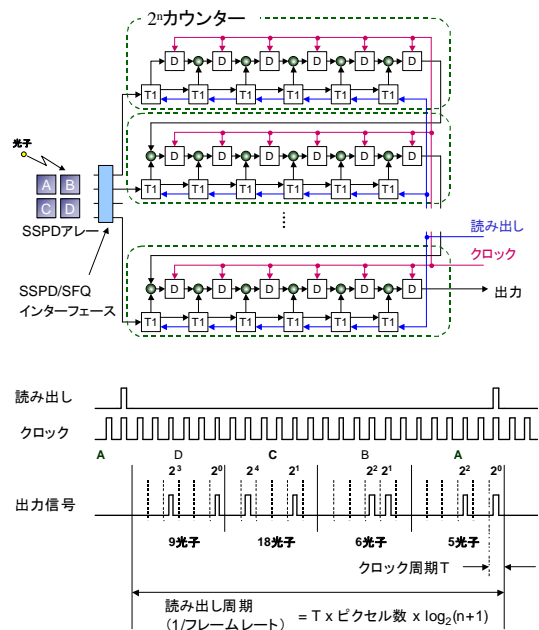
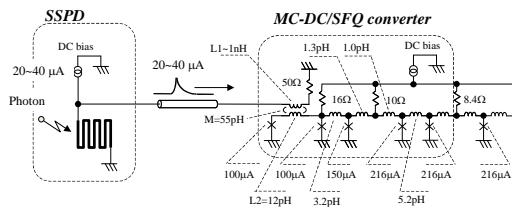


図 1 SFQ 回路による信号処理の例、(a) QKD システム用回路、(b) イメージングセンサ用回路

(1) SFQ 信号回路回路の設計と回路規模の評価

図 1 に読み出し信号処理の例を示す[8]。QKD システムに応用する場合、各々のピクセルからの出力信号の論理和を出力することになる。この動作を実現するには、ジョセフソン接合数 7 個からなる Confluence Buffer (CB) と呼ばれる論理ゲートを使用する。SFQ 論理ゲートの詳細は文献[9]で述べられている。QKD システムへの応用では、カウントレートがピクセル数 N の 2 乗で向上することを考慮すると、ピクセル数自体もそれほど多くを必要としないと考えられる。仮にピクセル数が 16 として、必要な CB ゲートは 15 個、接合数は 105 個である。SSPD/SFQ インターフェース回路が必要とする接合数は 10 個以内と思われるため、その他、配線用のジョセフソン伝送線路、電圧ドライバを含めても 500 接合に満たない接合数で回路を構成できる。一方、図 1 (b) に示したイメージングセンサ用の回路は、各々のピクセルからの出力をバイナリカウンタに蓄積し、外部からのクロックでシリアルに読み出す。出力信号のシーケンスにより、光子の当たったピクセル、当たった光子数を同定できるため、SSPD アレーはイメージングセンサとして機能する。仮に 1 ピクセルにつき、1 ビットのバイナリカウンタを接続したとして、バイナリカウンタ 1

a)



b)

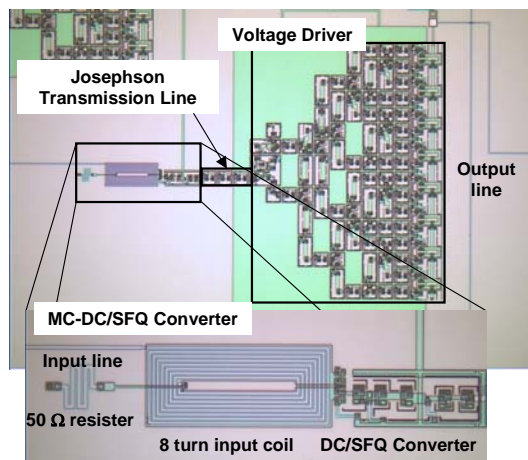


図 2 SSPD/SFQ インターフェース回路の、a)等価回路図、b)顕微鏡写真

つにつき 43 個の接合を含むので、10,000 接合規模の SFQ 回路で数百ピクセルの信号処理が可能と考えられる。また、将来的にさらに大規模な SFQ 回路の動作が可能となり、10,000 ピクセルの SSPD アレーが実現した場合、SFQ 回路を 10 GHz で動作させることで、1 MHz のフレームレートが実現可能となる。

(2) SSPD/SFQ インターフェース回路の設計とパルス発生器を用いた動作評価

図 2 に設計した SSPD/SFQ インターフェース回路の a) 等価回路図、b) 顕微鏡写真を示す。通常、外部入力パルスから SFQ パルスを生成する回路 (DC/SFQ コンバータ) の入力感度は $120 \mu\text{A}$ 程度であり、SSPD の出力信号 (約 $20 \mu\text{A}$) から SFQ パルスを生成するには入力感度が足りない。そこで、DC/SFQ コンバータの入力端に磁気トランスフォーマを設け、微弱な入力信号から SFQ パルスを生成する回路を新たに設計した。我々はこの回路を Magnetically-coupled DC/SFQ (MC-DC/SFQ) コンバータと命名した。回路シミュレーションにより、磁気トランスフォーマのコイル巻き数は 8 とした。

この MC-DC/SFQ コンバータとジョセフソン伝送線路、出力ドライバからなる SFQ 読み出し回路を設計し、繰り返し周期 100 MHz の方形波を入力として動作テストを行った。SFQ パルスは MC-DC/SFQ コンバータへの入力信号が立ち上がる時に 1 つだけ生成される。SFQ パルスはパルス高さ約 0.5 mV、パルス幅約 4 ps の微少信号である。生成した SFQ パルスは、ジョセフソン伝送線路を伝搬し、電圧ドライバ回路で出力電圧約 1.8 mV の方形波に再び変換される。電圧ドライバでは、SFQ パルスが入力される度に出力電圧が反転するため、SFQ パルスという微少信号を直接モニタすることなく検出できる。この回路全体に含まれるジョセフソン接合数は 285 個である。この回路を、信号入出力用の長さ約 1.2 m のセミリジッドケーブル 2 本を持つテストプローブを用いて、液体ヘリウム中で評価した。その結果、繰り返し周波数 100 MHz において、入力パルス電流値 $15.8 \sim 38.6 \mu\text{A}$ の範囲で正常動作を確認した。

(3) SFQ 読み出し回路の SSPD との接続試験

(2) で設計・評価した SFQ 読み出し回路を、実際に SSPD と接続してエラーレートの測定を行った。図 3 に実験のセットアップを示す。この実験において、SSPD は冷却能力 0.1 W の GM 冷凍機にマウントした。この冷凍機は、到達温度 2.9 K、温度変動 10 mK 以下のスペックを持つ。また、この実験で用いた SSPD の受光面積は $15 \mu\text{m}^2$ である。SSPD の作製、ファイバとのカップリングを含めた冷凍機へ

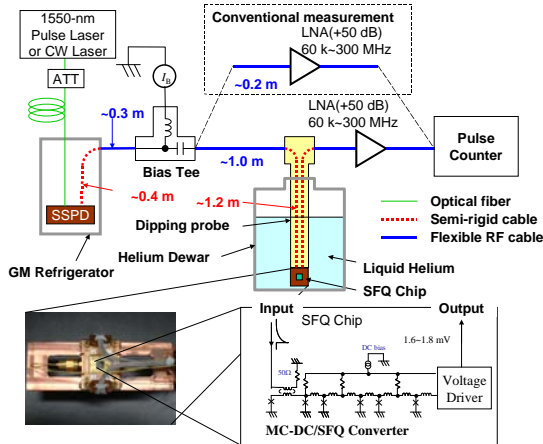


図3 SSPD と SFQ 読み出し回路の接続実験セットアップ

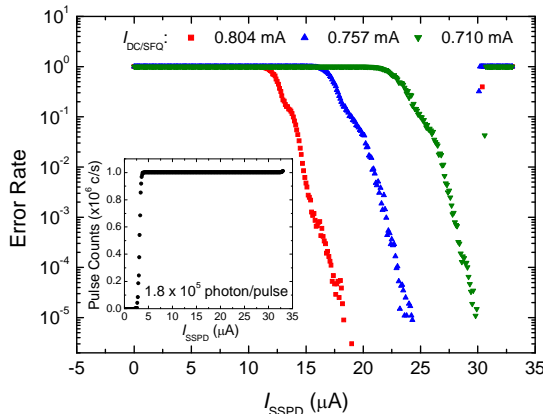


図4 SFQ 読み出し回路のエラーレートの SSPD バイアス依存性

の実装方法については文献[10], [11]で詳しく述べている。一方、SFQ 読み出し回路は、セミリジッドケーブル2本を持つテストプローブを用いて、液体ヘリウム中で冷却した。SSPD へのバイアス電流 (I_{SSPD}) はバイアステーの DC 端子から供給し、バイアステーの RF 端子は 1 m の同軸ケーブルを用いてテストプローブと接続した。SSPD から SFQ 読み出し回路までのケーブル総延長は約 3 m である。

図4にSFQ読み出し回路のエラーレートの I_{SSPD} 依存性を示す。SSPDのエラーと読み出し回路のエラーを区別するため、この測定においては単一光子ではなく、パルスあたり約 1.8×10^5 個の光子を含む 1550 nm 光波長帯パルスレーザーを用いて SSPD に照射した。図4の挿入図は、SSPDに低雑音増幅器(LNA)を直接接続し、出力パルス数を計測した結果である。パルスレーザーの発振周波数は 1 MHz、パルス数の計測時間は 1 秒間とした。計測されたパルス数は、 I_{SSPD} が $4.4 \sim 29.5 \mu\text{A}$ の範囲で 1, 000, 339 と一定であった。パルス数が完

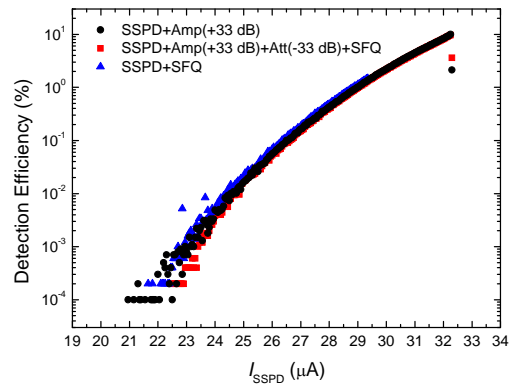


図5 単一光子検出効率の SSPD バイアス依存性

全に 1, 000, 000 に一致していないのは、パルスレーザーの発振周波数の精度不足が原因である。このことから、 I_{SSPD} が $4.4 \sim 29.5 \mu\text{A}$ の範囲では、SSPD はエラーフリーで動作していることが確認された。 I_{SSPD} が $29.5 \mu\text{A}$ 以上になると、ダークカウントが現れ、 I_{SSPD} が $33 \mu\text{A}$ で SSPD はラッチした。

次に SFQ 読み出し回路を接続し、 I_{SSPD} を変えながら電圧ドライバからの出力パルス数を計測した。 I_{SSPD} が $5 \mu\text{A}$ の時点で、SSPD からはエラーフリーで出力が得られているはずだが、MC-DC/SFQ コンバータの入力感度以下であるため、読み出し回路からの出力パルス数はゼロである。 I_{SSPD} が $10 \mu\text{A}$ を超えると、読み出し回路から徐々に出力パルスが現れ、 I_{SSPD} が $18.4 \mu\text{A}$ に達すると、エラーレートは 10^{-5} 以下となった。この測定においては、MC-DC/SFQ コンバータへのバイアス電流を動作上限値の 0.804 mA としたが、このバイアス電流を下げると電流感度は低下している。これは MC-DC/SFQ コンバータに限らず、通常の DC/SFQ コンバータでも一般的な振る舞いである[12]。一方、SFQ 読み出し回路を接続した場合、 I_{SSPD} が約 $30 \mu\text{A}$ のところで SSPD がラッチした。SFQ 読み出し回路を接続しなかった場合には、 I_{SSPD} は $33 \mu\text{A}$ までラッチしなかったことを考慮すると、SSPD に SFQ 読み出し回路を接続するほうが、LNA を接続するよりも反射波の影響がより大きいことが示唆される。

エラーレート測定で用いたパルスレーザー光源を 1550 nm 光波長帯の連続光源に変え、SSPD の単一光子に対する検出効率を測定した。光源の出力パワーは、入射光子数を 1 秒間に 10^6 とするため、冷凍機の入力ポートにおいて -98.92 dBm まで減衰させた。エラーレート測定で用いた SSPD はキャビティ構造を持たなかったが、この測定で検出効率を高めるためにキャビティ構造を持つ SSPD を使用した。図5に単一光子に対する検出効率の I_{SSPD} 依存性を示す。図5における黒丸は、SFQ 読み出し回路を接続しない通常の測定で得

られた結果である。検出効率が $I_{SSPD}=32.3 \mu\text{A}$ で 10%に達すると、SSPD はラッチして検出効率は 0%になっている。この結果をオリジナルカーブと呼ぶことにする。次に SFQ 読み出し回路を接続して同様の測定を行った。得られた結果を青三角で示す。低いバイアス領域ではオリジナルカーブをよくトレースしているが、 I_{SSPD} が $29.4 \mu\text{A}$ に達したところで SSPD はラッチしている。SFQ 回路を接続しない場合よりも、約 $3 \mu\text{A}$ 小さい電流でラッチしていることになる。この原因を SSPD と SFQ 読み出し回路間の何らかの相互作用によるものと考え、それらを抑制するために、バイアステーの RF 端子に +33 dB の LNA を接続した。ただし、SFQ 読み出し回路への入力レベルを一定とするため、LNA のゲインを相殺する -33 dB の減衰器も接続した。図 5 の赤四角が得られた結果であり、完全にオリジナルカーブと重なっている。以上の結果から、読み出し回路からの何らかの反射が存在し、SSPD の動作に影響を及ぼしていることが明らかとなった [13]。

MC-DC/SFQ コンバータにおける入力信号線は、 $R+j\omega L$ で終端されている。ここで、 R は設計値 50Ω の終端抵抗であり、 L は入力トランスフォーマにおけるコイルのインダクタンスである。2 端子法で測定した R は、セミリジッドケーブルやその他の配線抵抗を含めて 53Ω であり、設計値の 50Ω にほぼ近い値であった。一方、量子干渉素子 (SQUID) の測定から見積もられた L は約 1 nH であった。実測された SSPD のパルス立ち上がり時間は約 200 ps であり、 ωL はおよそ 31Ω と算出される。従って、SSPD からの出力信号に対する SFQ 読み出し回路の入力インピーダンスは、およそ 62Ω と見積もられる。定量的な評価は行っていないが、伝送線路とのインピーダンスミスマッチによる何らかの反射の影響があることは間違いないと考えられる。

反射波の影響は、反射波が SSPD まで戻ってくるまでの時間にも依存すると考えられる。同軸ケーブルの単位長さあたりの遅延を 5 ns/m とすると、SSPD から SFQ 読み出し回路までの距離は約 3 m なので、SSPD に反射波が戻ってくるまでの時間はおよそ 30 ns と見積もられる。一方、通常の測定では、SSPD から LNA までの距離が約 1 m なので、反射波が戻ってくるまでの時間はおよそ 10 ns である。今回使用した SSPD の受光面積は $15 \mu\text{m}^2$ であり、 L_k は 700 nH 程度である。SSPD が電圧状態に移った後、再び元の状態に回復するのにおよそ 14 ns を要する。通

常の測定では、SSPD が電圧状態から十分回復する前に反射波が戻ってきていると考えられる。この場合、仮に反射波が存在したとしても、その影響は少ないと思われる。一方、SFQ 読み出し回路を接続した場合は、SSPD が十分回復した後に、反射波が戻ってくるようになる。小さな反射波でも SSPD が臨界電流ぎりぎりまでバイアスされていれば、再び SSPD をスイッチさせることになり、以降同じプロセスが繰り返され、SSPD はラッチするものと考えられる。実際のラッチ現象は、このような電氣的要因だけでなく、熱的要因も考慮に入れる必要があるが、我々の結果はラッチ現象のメカニズムを理解する上でのヒントにはなるだろう。将来的には、SSPD と SFQ 読み出し回路を同一基板上に集積化すれば、SSPD の回復時間よりもはるかに速く反射波が戻るため、SFQ 読み出し回路を接続することでラッチしやすくなるという現象は抑制されるだろう。また、入力トランスフォーマの終端抵抗として 50Ω より小さな値を選び、積極的に負の反射波を発生させることも考えられる。このようなより積極的な反射波の制御により、熱的要因によるラッチ現象を回避することができるとも考えられる。

(4) 今後の展望

本研究により SSPD からの SFQ 回路による信号読み出しが可能であることが実証された。今後、SSPD と SFQ 回路を同一の冷凍機に実装し、4~8 ピクセルのアレーを実現すれば、SSPD のカウントレートを 16~64 倍に改善することができ、QKD システムの性能を大幅に向上させることができるだろう。さらにアレーを大規模化し、図 1b) に示した SFQ 読み出し回路と実装することで、イメージングセンサへの応用展開も視野に入ってくるだろう。動作可能な SFQ 回路の規模という観点からは、100 ピクセルのアレーは十分実現可能範囲であり、この研究の次なるマイルストーンとなるだろう。

参考文献

- [1] D. Rosenberg *et al*, Phys. Rev. A, vol. 71, no. 6, pp. 061803, 2005.
- [2] A. Verevkin *et al*, J. Mod. Opt., vol. 51, no. 9-10, pp. 1447-1458, 2004.
- [3] K. M. Rosfjord *et al*, Opt. Express, vol. 14, no. 2, pp. 527-534, 2006.
- [4] S. Miki *et al*, IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 17, pp. 285-288, 2007.
- [5] E. A. Dauler *et al*, IEEE Trans. on Appl.

- Supercond.*, vol. 17, pp. 279-284, 2007.
- [6] K. K. Likharev *et al*, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 1, pp. 3-28, 1991.
- [7] S. Nagasawa *et al*, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 5, pp. 2447-2450, 1995.
- [8] H. Terai *et al*, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 19, pp. 350-353, 2009.
- [9] S. Yorozu *et al*, *Physica C*, 378-381, pp. 1471-1474, 2002.
- [10] S. Miki *et al*, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 92, p. 061116, 2008.
- [11] S. Miki *et al*, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* Vol. 19, pp. 332-335, 2009.
- [12] S. Shinada *et al*, *Appl. Phys. Lett.* vol. 96, pp. 18254-18256, 2010.
- [13] H. Terai *et al*, *Appl. Phys. Lett.* vol. 97, pp. 112510_1-3, 2010.

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 寺井弘高、三木茂人、山下太郎、牧瀬圭正、王鎮、Demonstration of single-flux-quantum readout operation for superconducting single-photon detectors、*Appl. Phys. Lett.*、査読有、Vol. 97、No. 11、2010、pp. 112510_1-3
- ② 寺井弘高、三木茂人、王鎮、Readout Electronics Using Single-Flux-Quantum Circuit Technology for Superconducting Single-Photon Detector Array、*IEEE Trans. Appl. Supercond.*、査読有、Vol. 19、No. 3、2009、pp350-353

[学会発表] (計6件)

- ① 寺井弘高、SSPDアレー化のためのSFQ読み出し動作の実証、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2010年10月19日、機会振興会館。
- ② 寺井弘高、SSPD出力信号/SFQパルス変換動作の実証、第71回応用物理学会学術講演会、2010年9月17日、長崎大学文教キャンパス。
- ③ 寺井弘高、An optical input module with superconducting single-flux-quantum circuit operating at 1550 nm band、Applied Superconductivity Conference、2010年8月2日、Omuni Shoreham Hotel、Washington, D. C. USA.
- ④ 寺井弘高、Signal conversion of outputs from SSPD array into SFQ pulses for readout signal processing、12th International Superconductive Electronics Conference、2009年6月19日、九州大学100年記念講堂。

- ⑤ 寺井弘高、SSPDアレー出力信号処理を指したSSPD/SFQインターフェース回路の検討、第56回応用物理学関連連合講演会、2009年3月31日、筑波大学。
- ⑥ 寺井弘高、Readout electronics using single-flux-quantum circuit technology for superconducting single-photon detector array、Applied Superconductivity Conference、2008年8月19日、Hyatt Regency Hotel、Chicago USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺井 弘高 (TERAI HIROTAKA)

(独) 情報通信研究機構・未来 ICT 研究センター ナノ ICT 研究グループ・主任研究員

研究者番号：10359094

(2) 研究分担者

王 鎮 (Wang Zhen)

(独) 情報通信研究機構・未来 ICT 研究センター ナノ ICT 研究グループ・グループリーダー

研究者番号：70359090

三木 茂人 (MIKI SHIGEHITO)

(独) 情報通信研究機構・未来 ICT 研究センター ナノ ICT 研究グループ・主任研究員

研究者番号：30398424

(3) 連携研究者

()

研究者番号：