

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286077

研究課題名(和文) 超伝導単一光子検出器の超高性能化と量子情報通信への適用による新規パラダイムの創出

研究課題名(英文) Generation of new paradigm by realization of ultrahigh performance superconducting single photon detector

研究代表者

三木 茂人 (Miki, Shigehito)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所ナノICT研究室・主任研究員

研究者番号：30398424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超伝導単一光子検出器(SSPD)の性能向上を目指した開発を実施し、通信波長帯において検出効率70%以上、暗計数率100カウント/秒、タイミングジッタ70psの達成や、SSPDアレイの実現による従来比10倍以上の高速化など、従来技術では達成し得ない領域まで進化させることに成功した。また、SSPDを量子光学研究に展開することにより、90%以上の明瞭度を有する量子インターフェースの実現や、独立光子源からの2光子干渉観測など、これまで実現出来なかった技術の確立に成功した。

研究成果の概要(英文)：In this work, we realized the improvement of performance in superconducting single photon detector (SSPD) such as higher system detection efficiency than 70% at telecommunication wavelength, lower dark count rate than 100 counts/sec, timing jitter of 70ps, and 10 times higher speed operation than before the beginning of this work. We also realized new schemes in quantum information technology by applying SSPD such as quantum interface with 91% fidelity and observation of two photon interferences from independent photon sources.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：光子検出器 量子光学 超伝導デバイス

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 (Superconducting Nanowire Single Photon Detector:以下 SSPD)は、可視から近赤外にわたる波長領域で高感度を有し、アフターパルスフリー、低暗計数、高速動作、低ジッタ等の特徴を有していることから、本研究開始時(平成 25 年度)には、既に基礎量子光学や量子情報通信技術の研究分野において必要不可欠な基盤技術として認識されつつあったが、SSPD の性能自体は未だ発展途上段階にあり、今後さらなる性能向上が期待されていた。例えば、我々が本研究開始以前に開発した汎用 SSPD システム検出効率は、10-20%程度にとどまっており、最大計数率やタイミングジッタも、SSPD が有する潜在性能を十分に引き出せていなかった。これらの問題を解決し、究極的な性能を有した SSPD が実現すれば、これまで不可能であった量子光学や量子情報処理技術の実証を行うことが可能となってくる事が期待された。

例えば、我々は本研究開始以前に、長距離量子情報通信や高度な量子情報処理の実現を目指して、物質系から光に転写された量子状態(可視光付近)を光通信波長帯(~1550 nm)へ変換する波長変換量子インターフェースを世界に先駆けて実現することに成功していたが、この実証実験は半導体 APD 光子検出器の高暗計数と高ジッタが原因となり、理想的な量子状態の忠実度(100%)を遥かに下回る結果(75%)にとどまっていた。SSPD のタイミングジッタやカウトレートが劇的に向上し、波長変換量子インターフェースに適用する事が出来れば、忠実度が劇的な向上が期待できた。また、従来は離れた光子発生源からの量子力学的な干渉効果(2光子干渉)を観測するには、短パルス励起レーザーによって発生時間を光子のコヒーレンス時間以下となるように制御する必要があった。しかし、検出器のタイミングジッタが光子のコヒーレンス時間以下となるような場合には短パルスレーザーを用いずとも同時検出を正確に記録することで、2光子干渉を観測することが可能である。また、これにより量子エンタングルメントも作り出すことが可能である。これは量子光学の基礎実験として重要であるばかりでなく、遠く離れた系の間で量子状態を送信する際に同期した短パルスレーザーを必要としない新しい量子情報通信のパラダイムを提供することが期待された。

2. 研究の目的

量子光学や量子情報技術分野において、従来研究を超えた長距離量子情報通信や高度な量子情報を目指して、光と物質の相互作用を利用した量子状態制御に関する研究が盛んに行われている。研究背景で述べた様に、このような研究を推進するのに、高感度・低暗計数・高速動作可能な SSPD は、研究開発

当初から必要不可欠な基盤技術として認識されつつあった。本研究では、さらに SSPD の検出器性能を、従来の光子検出器では達成し得ない究極的な領域にまで進化させ、量子光学研究へ応用することで、これまで不可能であった超高忠実度量子インターフェースや独立光子源からの2光子干渉観測による量子エンタングルメントを実現する事により、新しい量子情報通信のパラダイムを創出する事を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、

- A. 超高性能 SSPD の実現に向けた研究
- B. 超高速量子情報処理の実現

の2つの研究テーマを基軸として有機的な連携を取りながら研究を進めた。研究テーマ A は SSPD の高検出効率化、高速化、低ジッタ化を目指し、**サンドイッチ型 SSPD 素子の開発**や、**多ピクセルアレイ化**、**SFQ 回路を用いた新たな信号処理方法の提案・実証・評価**を進める事により実現を目指した。研究テーマ B は、研究開発以前に既に開発済みの SSPD システムを利用して実験を進めると並行して、研究テーマ A で実現されたシステム性能を随時適用する事で、**超高忠実度量子インターフェース**や**独立光子源からの二光子干渉観測**など、新規量子情報処理の実現を目指した。具体的な研究内容としては次の研究成果で述べる。

4. 研究成果

3 で述べた研究テーマをさらに以下に示す4つのサブテーマに分割し、研究を推進した。各サブテーマに関する研究内容および得られた研究成果について以下に示す。

サンドイッチ型 SSPD 素子の開発による超高検出効率化の実現

SSPD において検出効率を決定因子の一つとして、受光面内の光吸収率が挙げられる。本研究では、光キャビティ層を超伝導ナノワイヤの上下に挟み込むような新規構造を採用する事によって、光吸収率の劇的な向上を試みた。このような構造を達成するためには、ナノワイヤ下部の光キャビティ層表面において原子層レベルでの平坦性を確保しないと、高品質なナノワイヤ自体を作製する事が困難となるが、熱酸化膜付のシリコン(Si)基板を基板材料として採用する事により図1に示すような、サンドイッチ型 SSPD 素子の作製に成功した。また、作製されたサンドイッチ型 SSPD 素子は高効率光結合パッケージに実装され、システム検出効率、暗計数率やタイミングジッタの性能評価を行ったところ、図2に示すように、暗計数率 100 カウント/秒において 70%を超えるシステム検出効率や 70ps のタイミングジッタなど、これまでの SSPD を大きく上回る性能を達成する事に成功した[雑誌論文 3,6,11]。

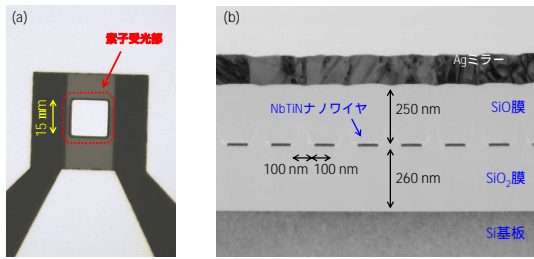


図1. 作製されたサンドイッチ型 SSPD 素子の (a)光学顕微鏡写真及び(b)断面 TEM 観察像

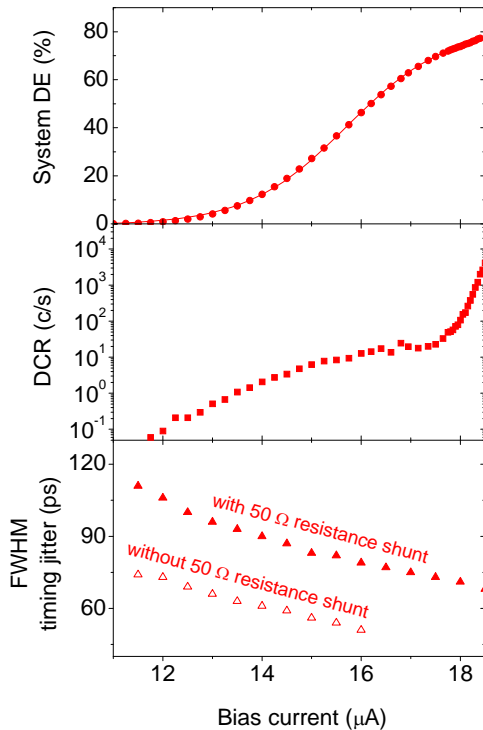


図2. サンドイッチ型 SSPD 素子の検出効率、暗計数率、タイミングジッタのバイアス電流依存性

多ピクセル SSPD アレイ素子と SFQ 多重化回路による超高速動作の実現

SSPD は入射される光子との高結合効率を達成するために、極長いナノワイヤをメアンダ状に配置することで広受光面積を実現しているが、同時に大きなインダクタンス成分が発生してしまい、カウントレートを律速してしまっている。これを解決する効果的な手法として、SSPD の多ピクセル化が考えられる。受光面積を保ったまま n 分割することにより単素子辺りのナノワイヤ長が短くなるためインダクタンス成分が $1/n$ となり、1 ピクセルあたりの光子入射確率も $1/n$ となる為、結果的にカウントレートは n^2 のオーダーで高速化可能となる。本サブテーマでは多ピクセル SSPD アレイ素子の開発および、各ピクセルからの信号を冷凍機内で高速多重化処理を行う為の超伝導単一磁束量子回路開発を行った。

SSPD アレイにおいて、各ピクセルに均一な光子入射確率が得られるようにインターリ

ープ型構造を採用した。これらを考慮した上で、4 ピクセルおよび 8 ピクセルの SSPD アレイ素子作製を行い、検出効率および高速応答特性評価を行った。まず、波長 1550nm において全ピクセルを総合したシステム検出効率の評価を行った結果、4 ピクセル素子では 60%、8 ピクセル素子において 77.2%と単ピクセル SSPD 素子と同等の高い検出効率を得られ、達成目標である 50%以上を実現する事に成功した。また、素子の高速応答性評価においては、従来の単ピクセル SSPD に比べて、4 ピクセル素子で、10 倍程度の高速化に成功した[学会発表 23]。

超高忠実度を有した波長変換量子インターフェースの実現

光の量子状態を保持しつつ波長を変換することが可能な量子インターフェースは強い励起光による非線形光学効果を利用する。我々は非線形光学結晶として導波路型 PPLN を用い、差周波発生を用いて実験を行っている。その変換効率は 780nm の光子に対して 70% を超える。効率は励起光強度に依存し、高効率変換には高い励起強度が必要となる。一方で、波長変換の入力と出力は単一光子であるため、単一光子レベルの弱い光雑音も実験の忠実度に依存する。励起光強度が大きくなれば、そのラマン散乱によって入力とは無関係に出力の波長帯に散乱光を放出し、光雑音となり、実験の SN を低下させている。入力の単一光子はパルス光であるのに対して、励起光は連続光であることから、光子検出器の時間分解能が十分に高ければ、その影響を無視できるほど小さくすることができる。SSPD はこれに対して理想的な性能を実現する。われわれの実験では従来 75%程度にとどまっていた忠実度を 93%にまで引き上げることに成功した。さらに、これを用いて、2 つの変換した単一光子の二光子干渉実験を行い、その明瞭度として 76%を得た。古典限界が 50%であるため、十分な非古典性を確認している。解析の結果、入力の単一光子の不完全性を取り除くことで、91%までの明瞭度を実現することもわかった[雑誌論文 9]。これにより、波長変換量子インターフェースを利用した量子通信プロトコルの実現の要素技術が揃った。加えて、この高忠実度化された量子インターフェースでの量子状態操作の一環として単一光子の周波数干渉計の動作実験を行い、十分な性能を示すことができた[雑誌論文 1]。また、その他の入力波長の動作確認実験として、ダイヤモンド NV センターによる単一光子発生のための波長変換量子インターフェースを作製し、性能評価を行った[雑誌論文 5]。

同期レーザーのない独立光子源からの 2 光子干渉観測

SSPD の低ジッタ化により、従来行われてき

たパルス光励起光子対源からの高忠実度な二光子干渉を連続光励起光子対源からでも実現する手法を開発した。独立な光源からの二光子干渉実験は量子テレポーテーション、量子リレーやそれを拡張した量子中継に代表される量子通信プロトコルの基礎となっている。通常はその干渉性を高めるためにパルス光励起光子対源を同期動作させるのが一般的である。しかし、光子対のコヒーレンス時間より低ジッタ（高時間分解能）の光子検出器を用いれば、連続光励起光子対源から同時タイミングの光子対を抽出することができるため、同期の問題が必要ない。長距離通信において、離れた光源の同期は難しいため、このような非同期光源による量子通信の実現は重要である。また、同じ方法は不完全な同期光源を高精度化することができる一般的な方法にもなる。実験では、導波路型PPLNを用いた高効率な光子対光源(780 nm→1541 nm + 1580 nm)を実現し、従来の明瞭度の世界記録である77%を大きく超える87%を得ることができた[学会発表15]。特にこれまでのパルス光励起光子対源での二光子干渉の明瞭度と光子検出器による二光子干渉の明瞭度は、若干異なるため、正しい比較ができない問題もあった。これも解決する新しい明瞭度の評価方法も確立することができた[現在論文準備中]。また、これらを利用する事ができる新しい量子プロトコルの提案を行った[雑誌論文6]。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計11件)

1. 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*, 査読有, 2016
DOI: 10.1038/nphoton.2016.74.
2. K. Waki, T. Yamashita, S. Inoue, S. Miki, H. Terai, R. Ikuta, T. Yamamoto, and N. Imoto, Fabrication and Characterization of Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors on Si Waveguide, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 査読有, vol. 25, 2015, pp.1-4
DOI:10.1109/TASC.2014.2385836
3. 三木茂人, 山下太郎, 王鎮, 寺井弘高, ダブルサイドキャビティ付超伝導単一光子検出器の特性評価, 電子情報通信学会論文誌 C, 査読有, vol. J97-C, no. 10,2014, pp. 357-364
URL:http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j97-c_10_357&category=C&lang=J&year=2014&abst=
4. 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. Eng.*, 査読有, vol. 53, 2014, pp. 081907
DOI: 10.1117/1.OE.53.8.081907
5. R. Ikuta, T. Kobayashi, S. Yasui, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, and N. Imoto, Frequency down-conversion of 637 nm light to the telecommunication band for non-classical light emitted from NV centers in diamond, *Opt. Express*, 査読有, vol. 22, 2014, pp. 11205.
DOI: 10.1364/OE.22.011205
6. T. Kobayashi, R. Ikuta, S. K. Ozdemir, M. Tame, T. Yamamoto, M. Koashi and N. Imoto, Universal gates for transforming multipartite entangled Dicke states, *New J. Phys.*, 査読有, vol.16, 2014, pp. 023005.
DOI: 10.1088/1367-2630/16/2/023005
7. T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, and Z. Wang, Low-filling-factor superconducting single photon detector with high system detection efficiency, *Opt. Express*, 査読有, vol. 21, 2013, pp. 27177-27184
DOI: 10.1364/oe.21.027177
8. R. Ikuta, T. Kobayashi, H. Kato, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, and N. Imoto, Observation of two output light pulses from a partial wavelength converter preserving phase of an input light at a single-photon level, *Opt. Express*, 査読有, vol. 21, 2013, pp. 27865.
DOI: 10.1364/OE.21.027865
9. R. Ikuta, T. Kobayashi, H. Kato, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, and N. Imoto, Nonclassical two-photon interference between independent telecommunication light pulses converted by difference-frequency generation, *Phys. Rev. A*, 査読有, vol. 88, 2013, pp. 042317
DOI: 10.1103/PhysRevA.88.042317
10. H. Kumagai, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, Robustness of quantum communication based on a decoherence-free subspace using a counter-propagating weak coherent light pulse, *Phys. Rev. A*, 査読有, vol. 87, 2013, pp. 052325
DOI: 10.1103/PhysRevA.87.052325

11. S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, Z. Wang, High performance fiber-coupled NbTiN superconducting nanowire single photon detectors with Gifford-McMahon cryocooler, *Opt. Express*, 査読有, vol. 21, 2013, pp. 10208-10214
DOI: 10.1364/OE.21.010208

[学会発表](計 28 件)

1. 三木茂人, 山下太郎, 寺井弘高, アバランシェ型超伝導ナノワイヤ単一光子検出素子の特性評価, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 21 日, 東京都目黒区 東京工業大学大岡山キャンパス
2. 山下太郎, 三木茂人, 寺井弘高, 誘電体多層膜付きインターリーブ型 SSPD アレイの開発, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 21 日, 東京都目黒区 東京工業大学大岡山キャンパス
3. 達本吉朗, 杉浦幸大, 田中元基, 生田力三, 三木茂人, 山下太郎, 寺井弘高, 山本俊, 小芦雅斗, 井元信之, 時間分会測定による高忠実度なエンタングルメントスワッピング実験, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 21 日, 宮城県仙台市東北学院大学泉キャンパス
4. 和木健太郎, 山下太郎, 井上振一郎, 三木茂人, 寺井弘高, 生田力三, 山本俊, 井元信之, SOI 基板を用いた導波路結合型 SSPD 素子の作製, 2016 年電子情報通信学会総合大会, 2016 年 3 月 15 日, 福岡県福岡市九州大学井部キャンパス
5. H. Terai, S. Miki, T. Yamashita, K. Makise, Superconducting nanowire single-photon detector and its signal readout using superconducting digital electronics, 8th East Asian Symposium on Superconductive Electronics, 2015 年 11 月 5 日, Campus of KRISS, Daejeon, Korea
6. 三木茂人, 山下太郎, 寺井弘高, インターリーブ型 4 エlement 超伝導単一光子検出素子の特性評価, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015 年 9 月 14 日, 愛知県名古屋市名古屋国際会議場
7. 山下太郎, 三木茂人, 寺井弘高, 誘電体多層膜を用いた超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の光学設計, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015 年 9 月 14 日, 愛知県名古屋市名古屋国際会議場
8. 和木健太郎, Robert Kirkwood, 山下太郎, 三木茂人, 寺井弘高, 誘電体多層膜を用いた可視波長帯超伝導ナノワイヤ単一光子検出器, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015 年 9 月 14 日, 愛知県名古屋市名古屋国際会議場
9. T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, Flexible optical design and characterization of superconducting nanowire single-photon detectors with dielectric multilayer, Single Photon Workshop 2015, 2015 年 7 月 14 日, University of Geneva, Geneva, Switzerland
10. S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, Characterization of multi pixel NbTiN Superconducting Nanowire Single Photon Detectors, Single Photon Workshop 2015, 2015 年 7 月 14 日, University of Geneva, Geneva, Switzerland
11. K. Waki, T. Yamashita, S. Inoue, S. Miki, H. Terai, R. Ikuta, T. Yamamoto, N. Imoto, Characterization of NbTiN-Based Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors on Si Waveguide, 15th International Superconducting Electronics Conference, 2015 年 7 月 6 日, 愛知県名古屋市名古屋大学、名古屋能楽堂
12. S. Miki, T. Yamashita, Z. Wang, H. Terai, Multi pixel superconducting single photon detectors with superconducting single flux quantum readout circuit, 15th International Superconducting Electronics Conference (招待講演), 2015 年 7 月 6 日, 愛知県名古屋市名古屋大学、名古屋能楽堂
13. S. Miki, Development and applications of superconducting nanowire single photon detectors, KPS Spring Meeting 2015(招待講演), 2015 年 4 月 23 日, Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea
14. 杉浦幸大, 生田力三, 三木茂人, 山下太郎, 寺井弘高, 藤原幹生, 山本俊, 小芦雅斗, 佐々木雅英, 王鎮, 井元信之, 時間分解同測定による高明瞭度の Hong-Ou-Mandel 干渉実験, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 11 日, 神奈川県平塚市 東海大学湘南キャンパス
15. 三木茂人, 進化する超伝導単一光子検出器技術と応用分野への波及効果, 応用物理学会秋季応用物理学会学術講演会(招待講演), 2014 年 9 月 19 日, 北海道札幌市 北海道大学札幌キャンパス
16. S. Miki, T. Yamashita, Z. Wang, H. Terai, Characterization of multi pixel superconducting nanowire single photon detectors, Applied Superconductivity Conference 2014, 2014 年 8 月 14 日, The Charlotte Convention Center, Charlotte, U. S.
17. H. Terai, K. Makise, T. Yamashita, S. Miki, Z. Wang, Design and testing of SFQ signal processor for 64-pixel SSPD array, Applied Superconductivity

- Conference 2014, 2014 年 8 月 11 日, The Charlotte Convention Center, Charlotte, U. S.
18. 寺井弘高, 三木茂人, 山下太郎, 竹内尚輝, 64 ピクセル SSPD アレイ用 SFQ 信号処理回路の動作と冷凍機実装実験, 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス 146 委員会, 2014 年 7 月 23 日, 東京都港区機会振興会館
 19. 寺井弘高, 三木茂人, 山下太郎, 牧瀬圭正, 梶野顕明, 王鎮, SFQ による超伝導単一光子検出器アレイ読み出し回路, 2014 年電子情報通信学会総合大会(招待講演), 2014 年 3 月 20 日, 新潟県新潟大学五十嵐キャンパス
 20. 三木茂人, 山下太郎, 王鎮, 寺井弘高, 超伝導ナノワイヤを用いた単一光子検出技術の進展, 2014 年電子情報通信学会総合大会(招待講演), 2014 年 3 月 20 日, 新潟県新潟大学五十嵐キャンパス
 21. 三木茂人, 山下太郎, 王鎮, 寺井弘高, 64 ピクセル超伝導単一光子検出素子の特性評価, 2014 年第 61 回応用物理学会春期学術講演会, 2014 年 3 月 18 日, 神奈川県青山学院大学相模原キャンパス
 22. 寺井弘高, 牧瀬圭正, 山下太郎, 三木茂人, 王鎮, 64 ピクセル SSPD アレイ用 SFQ 回路の設計と動作, 2014 年第 61 回応用物理学会春期学術講演会, 2014 年 3 月 18 日, 神奈川県青山学院大学相模原キャンパス
 23. S. Miki, Recent progress of superconducting single photon detectors, Quantum Science Symposium ASIA-2013, 2013 年 11 月 26 日, 東京大学山上会館
 24. T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise, Z. Wang, Single-flux-quantum readout technique for multi-pixel superconducting nanowire single-photon detector array, The 26th International Superconductivity Symposium(招待講演), 2013 年 11 月 20 日, 東京都江戸川区 タワーホール船堀
 25. S. Miki, T. Yamashita, Z. Wang, H. Terai, Superconducting single photon detectors for near infrared wavelength with high sensitivity, low noise, and high timing resolution, 18th International Workshop on Laser Ranging, 2013 年 11 月 12 日, 山梨県富士吉田市 ハイランドリゾート&スパ
 26. T. Yamashita, S. Miki, Z. Wang, H. Terai, High performance multichannel superconducting single-photon detector system with Gifford-McMahon cryocooler, Single Photon Workshop 2013, 2013 年 10 月 15 日, Oak Ridge National Laboratory, TN, U.S.
 27. S. Miki, T. Yamashita, Z. Wang, K. Makise, H. Terai, 64 pixel NbTiN superconducting nanowire single photon detectors with SFQ readout circuit, European Conference on Applied Superconductivity, 2013 年 9 月 16 日, Magazzini del Cotone, Genova, Italy
 28. S. Miki, T. Yamashita, Z. Wang, K. Makise, H. Terai, Technologies for superconducting nanowire single-photon detector array system, SPIE Defense, Security, and Sensing(招待講演), 2013 年 5 月 1 日, Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, U.S.
- 〔図書〕(計 1 件)
- R. Hadfield, S. Miki, T. Yamamoto 他, Superconducting Devices in Quantum Optics, Springer, 総ページ数 249 ページ, 担当 pp. 107-135, 2016
- 〔産業財産権〕
出願状況(計 2 件)
1. 名称: 信号処理回路
発明者: 三木茂人, 寺井弘高, 山下太郎, 宮嶋茂之
権利者: 独立行政法人情報通信研究機構
種類: 特許
番号: 特願 2016-023303
出願年月日: 2016 年 2 月 10 日
国内外の別: 国内
 2. 名称: 超伝導単一光子検出器及び超伝導単一光子検出器の光学設計方法
発明者: 山下太郎, 三木茂人, 寺井弘高
権利者: 独立行政法人情報通信研究機構
種類: 特許
番号: 特願 2014-250561
出願年月日: 2014 年 12 月 11 日
国内外の別: 国内
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
三木 茂人(MIKI, Shigehito)
国立研究開発法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室・主任研究員
研究者番号: 3 0 3 9 8 4 2 4
 - (2) 研究分担者
寺井 弘高(TERAI, Hiroataka)
国立研究開発法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室・研究マネージャー
研究者番号: 1 0 3 5 9 0 9 4
 - (3) 研究分担者
山本 俊(YAMAMOTO, Takashi)
大阪大学・基礎工学研究科・准教授
研究者番号: 1 0 4 0 3 1 3 0