

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2016年12月22日(22.12.2016)



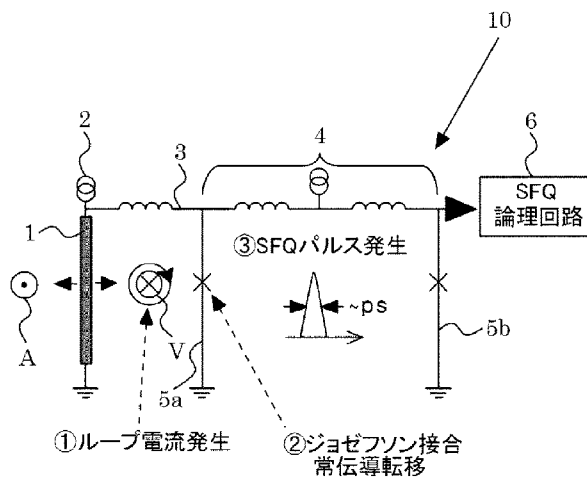
(10) 国際公開番号
WO 2016/204168 A1

- (51) 国際特許分類:
G01J 1/02 (2006.01) H01L 39/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/067747
- (22) 国際出願日: 2016年6月15日(15.06.2016)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2015-123764 2015年6月19日(19.06.2015) JP
- (71) 出願人: 国立研究開発法人産業技術総合研究所
(NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒1008921 東京都千代田区霞が関1丁目3番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 全 伸幸(ZEN Nobuyuki); 〒3058568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 馬渡 康徳(MAWATARI Yasunori); 〒3058568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 藤井 剛(FUJII Go); 〒3058568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 吉川 信行(YOSHIKAWA Nobuyuki); 〒2400032 神奈川県横浜市保土ヶ谷区岩井町250-1-403 Kanagawa (JP).
- (74) 代理人: 塩田 伸(SHIODA Shin); 〒3050032 茨城県つくば市竹園2丁目10-14 和宏ビル201号 ホームタウン特許事務所 Ibaraki (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨー

[続葉有]

(54) Title: PHOTON DETECTION DEVICE AND PHOTON DETECTION METHOD

(54) 発明の名称: 光子検出装置及び光子検出方法



- 6 SFQ logic circuit
- ① Loop current generated
- ② Josephson coupling normal conductivity transition
- ③ SFQ pulse generated

(57) Abstract: [Problem] To provide a photon detection device and a photon detection method which are practical, which make it possible to perform photon detection that produces no after pulse and suppresses the generation of dark count, and which allow a high count rate to be achieved at a low jitter. [Solution] This photon detection device is characterized by having: a photon detection unit which has a superconducting strip wire in an elongated plate shape, a plate surface of which constitutes a photon detection surface, and a bias current supply means for supplying a bias current to the superconducting strip wire; and a single-flux quantum comparator circuit capable of detecting flux that is scattered from the superconducting strip wire during photon detection.

(57) 要約: 【課題】実用的で、アフターパルスがなく、ダークカウンターの発生を抑えた光子検出を行うことができ、かつ、低ジッタで高い計数率が得られる光子検出装置及び光子検出方法を提供すること。【解決手段】本発明の光子検出装置は、板面が光子検出面とされる長板状の超伝導ストリップ線及び前記超伝導ストリップ線にバイアス電流を供給するバイアス電流供給手段を有する光子検出部と、光子検出時に前記超伝導ストリップ線から飛散する磁束を検出可能な単一磁束量子コンパレータ回路と、を有することを特徴とする。



WO 2016/204168 A1

ロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：光子検出装置及び光子検出方法

技術分野

[0001] 本発明は、超伝導ストリップ線を用いた光子検出装置及び光子検出方法に関する。

背景技術

[0002] 情報安全性の確保は、ネットワーク社会の緊急課題であり、量子暗号通信が中核を担う技術として期待されている。

しかしながら、現状の安全鍵生成率は、十分ではなく実用的ではない。実用的な安全鍵生成率を実現するためには、光子検出器の高性能化が必須であり、緊急の課題である。

[0003] 従来、通信波長帯（1, 550 nm）の光子検出には、InGaAsアバランシェフォトダイオード（APD；Avalanche Photodiode）が広く用いられてきたが、アフターパルスの発生やダークカウントが多いという問題がある。これらの問題は、鍵生成の誤り率を増大させる要因であるが、APDの動作原理上、避けることは困難である。

[0004] また、従来、超伝導ストリップ光子検出装置（SSPD；Superconducting Strip Photon Detector）が光子検出に用いられている（特許文献1，2参照）。SSPDは、アフターパルスの発生がなく、ダークカウントが比較的少ないという特長を有しており、量子暗号通信を実現する光子検出器として有力である。

しかしながら、SSPDは、動作原理上、高い感度とダークカウントレートを両立させることは困難である。

[0005] 従来のSSPD光子検出装置の等価回路を図1（a）に示す。SSPDは、厚さが数nm、幅が数十～数百nmの超伝導ストリップ線から構成される光子検出装置であり、常時バイアス電流を超伝導ストリップ線に流して動作させる。バイアス電流を流した状態の超伝導ストリップ線に光子が入射され

ると、超伝導ストリップ線の幅方向に完全な常伝導領域が形成される（図1（a）、N参照）。するとバイアス電流は、順方向に流ることができなくなり、測定系に電流パルスが出力される。SSPDでは、この電流パルスを光子検出信号として利用する。

ここで、光子が超伝導ストリップ線に入射された際に電流パルスが発生する確率（量子効率）、即ち感度は、図1（b）に示すように、バイアス電流の大きさに依存する（非特許文献1参照）。バイアス電流が大きいほど量子効率が高くなるが（左軸参照）、同時にダークカウントも増加する（右軸参照）。なお、図1（b）は、量子効率のバイアス電流依存性とダークカウントレートのバイアス電流依存性を示す図である。

このように、SSPD光子検出装置では、高い感度と低いダークカウントレートを両立させることは不可能である。

[0006] また、電流パルスを光子検出原理とするため、図1（a）に示す電流パルスを増幅するための低ノイズアンプを用いる必要がある。低ノイズアンプは、検出システムのジッタに悪影響を及ぼす問題がある。

また、光子検出原理である電流パルスの立下り時間 τ は、超伝導ストリップ線のインダクタンス L の大きさによって制限される。インダクタンス L は、超伝導ストリップ線の全長の断面積に反比例し、インダクタンス L の大きさを小さくするためには、超伝導ストリップ線の断面積を大きくする必要がある。しかしながら、感度（量子効率）の観点から超伝導ストリップ線の断面積は、小さくしなければならず、これが大きいと光子入射の際の常伝導領域の形成が不完全となり、感度が低下する。そのため、インダクタンス L は、大きくならざるを得ない。したがって、電流パルスの立下りが緩やかで立下り時間 τ が長くなり、延いては、システムの応答時定数が数十nsと大きくなり、計数率が数百MHz程度しか得られない問題がある。

先行技術文献

特許文献

[0007] 特許文献1：米国特許出願公開第2005/0051726号明細書

特許文献2：特開2011-176159号公報

非特許文献

[0008] 非特許文献1：C. M. Natarajan et al., Supercond. Sci. Technol. 25, 063001 (2012).

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0009] 本発明は、従来技術における前記諸問題を解決し、実用的で、アフターパルスがなく、ダークカウントの発生を抑えた光子検出を行うことができ、かつ、低ジッタで高い計数率が得られる光子検出装置及び光子検出方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0010] 前記課題を解決するための手段としては、以下の通りである。即ち、

<1> 板面が光子検出面とされる長板状の超伝導ストリップ線及び前記超伝導ストリップ線にバイアス電流を供給するバイアス電流供給手段を有する光子検出部と、光子検出時に前記超伝導ストリップ線から飛散する磁束を検出可能な単一磁束量子コンパレータ回路と、を有することを特徴とする光子検出装置。

<2> 単一磁束量子コンパレータ回路が、少なくとも配線内にジョセフソン接合を有するジョセフソン接合配線と、前記ジョセフソン接合配線—超伝導ストリップ線間を電氣的に接続する超伝導配線とを有し、前記超伝導ストリップ線と前記超伝導配線と前記ジョセフソン接合配線とで磁束を検出可能な超伝導ループが構成される前記<1>に記載の光子検出装置。

<3> バイアス電流供給手段が超伝導ストリップ線の臨界電流値に対し、値が60%～85%の大きさのバイアス電流を前記超伝導ストリップ線に流す手段である前記<1>から<2>のいずれかに記載の光子検出装置。

<4> 検出対象の光子が導波される光導波路上に超伝導ストリップ線が配される前記<1>から<3>のいずれかに記載の光子検出装置。

<5> 光導波路の光導波方向に沿って超伝導ストリップ線が複数配されるとともに、個々の前記超伝導ストリップ線に対応して光子検出部と単一磁束量子コンパレータ回路が複数配され、更に、個々の前記単一磁束量子コンパレータ回路から出力されるそれぞれの出力信号が統合して入力される統合入力回路が配される前記<4>のいずれかに記載の光子検出装置。

<6> 更に、参照時間信号の入力時間と、磁束の検出に伴い単一磁束量子コンパレータ回路又は統合入力回路から出力される出力信号の入力時間との時間差を計測し、前記時間差から前記出力信号をデジタルデータ化する時間デジタル変換器を有する前記<1>から<5>のいずれかに記載の光子検出装置。

<7> 前記<1>から<6>のいずれかに記載の光子検出装置を用いて光子を検出する方法であって、バイアス電流を超伝導ストリップ線に流した状態で検出面に前記光子を入射させ、前記光子の入射により前記超伝導ストリップ線から飛散する磁束を単一磁束量子コンパレータ回路で検出することで、前記光子を検出することを特徴とする光子検出方法。

<8> 超伝導ストリップ線の臨界電流値に対し、値が60%~85%の大きさのバイアス電流を前記超伝導ストリップ線に流す前記<7>に記載の光子検出方法。

発明の効果

[0011] 本発明によれば、従来技術における前記諸問題を解決することができ、実用的で、アフターパルスがなく、ダークカウントの発生を抑えた光子検出を行うことができ、かつ、低ジッタで高い計数率が得られる光子検出装置及び光子検出方法を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0012] [図1(a)]従来のSSPD光子検出装置の等価回路を示す図である。

[図1(b)]量子効率のバイアス電流依存性とダークカウントレートのバイアス電流依存性を示す図である。

[図2]本発明の第1の実施形態の概要を示す説明図である。

[図3(a)]超伝導ストリップ線に光子が入射された際にの超伝導秩序パラメータの時間的変動をシミュレートした結果を示す図である。

[図3(b)]磁束－反磁束対の解離状況を示す説明図である。

[図3(c)]光子が入射した際に超伝導ストリップ線中に起きる現象とバイアス電流との関係を示す図である。

[図4]本発明の第2の実施形態の概要を示す説明図である。

[図5]本発明の第3の実施形態の概要を示す説明図である。

発明を実施するための形態

[0013] (光子検出装置及び光子検出方法)

<第1の実施形態>

本発明の第1の実施形態の概要を図2に示す。

光子検出装置10は、主として超伝導ストリップ線1と、単一磁束量子(SFQ; Single Flux Quantum)回路としてのジョセフソン伝送線路(JTL; Josephson Transmission Line)回路4とで構成される。

[0014] 超伝導ストリップ線1は、板面が光子検出面とされる長板状の部材である。この超伝導ストリップ線1としては、特に制限はなく公知のものから適宜選択して用いることができる。

また、超伝導ストリップ線1の形状としては、特に制限はないが、ここでは超伝導ストリップ線1から排除される磁束を線の長さ方向と直交する方向に排除させ、JTL回路4での磁束検出を安定化させる目的から直線状の形状とされる。ただし、直線状とする場合でも、光子入射時に線外に排除される磁束をJTL回路4で検出可能な限り、直線状の部位の他に直線状以外の部位を付加することを妨げない。

超伝導ストリップ線1の線幅としては、特に制限はなく、一般に10nm～200nm程度であり、厚みとしても、特に制限はなく、1nm～20nm程度である。

また、超伝導ストリップ線1の長さとしては、特に制限はないが、1μm

以上 $10\ \mu\text{m}$ 未満が好ましく、 $2\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ がより好ましい。長さが $1\ \mu\text{m}$ 未満であると、光子吸収率が低くなり、 $10\ \mu\text{m}$ 以上であると JTL 回路 4 での電流検出感度が低下することがある。

[0015] 超伝導ストリップ線 1 には、バイアス電流が供給される。バイアス電流を供給するバイアス電流供給手段としては、特に制限はなく、例えば、電流源 2 を介して適宜の大きさのバイアス電流を供給する手段が挙げられる。光子検出装置 10 では、超伝導ストリップ線 1 と前記バイアス電流供給手段とで光子検出部が構成される。

[0016] 光子検出装置 10 では、JTL 回路 4 の初段を構成し配線内にジョセフソン接合 (図 2 中、×で示す接合) を有するジョセフソン接合配線 5 a と、超伝導ストリップ線 1 との間を電氣的に接続する超伝導配線 3 とが配され、超伝導ストリップ線 1 と超伝導配線 3 とジョセフソン接合配線 5 a とで磁束を検出可能な超伝導ループが構成される。

即ち、光子検出装置 10 では、超伝導配線 3 とジョセフソン接合配線 5 a とで SFQ コンパレータ回路を構成する。

超伝導配線 3 としては、特に制限はなく、キャパシタが比較的小さいものを採用してもよいが、超伝導ストリップ線 1 にバイアス電流を流し易くするため、キャパシタが比較的大きいものを採用してもよい。また、超伝導ストリップ線 1 とジョセフソン接合配線 5 a とは、前記超伝導ループを構成するため共通の接地で接続される。

なお、JTL 回路 4 としては、特に制限はなく、公知の JTL 回路と同様の構成とすることができる。また、ジョセフソン接合としては、2つの超伝導材中に薄い絶縁膜を挟む態様のほか、超伝導材の一部を他の部分よりも細く加工して形成した態様 (弱結合) 等のジョセフソン効果を生じさせる接合を含む。

[0017] 光子検出装置 10 では、前記超伝導ループが超伝導ストリップ線 1 から飛散する磁束を捉えるため、例えば、超伝導ストリップ線 1 の幅方向の延長上に直線状の超伝導ストリップ線 1 の長さ方向と平行してジョセフソン接合配

線 5 a を配して構成される。

また、磁束の減衰を避けるため、ジョセフソン接合配線 5 a としては、超伝導ストリップ線 1 の近傍に配されることが好ましく、超伝導ストリップ線 1 - ジョセフソン接合配線 5 a 間の距離としては、最短距離で $1 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ であることが好ましい。

[0018] 光子検出装置 10 の変形例として、超伝導配線 3 を設けず、超伝導ストリップ線 1 と J T L 回路 4 とを別体で構成し、J T L 回路 4 中の超伝導ループで超伝導ストリップ線 1 から飛散する磁束を検出するように構成することもできる。この変形例では、J T L 回路 4 が S F Q コンパレータ回路を構成する。

[0019] しかしながら、前記超伝導ループを図 2 に示す超伝導ストリップ線 1 と超伝導配線 3 とジョセフソン接合配線 5 a と構成すると、超伝導配線 3 を含め、磁束を排出する超伝導ストリップ線 1 と当該磁束を S F Q パルスとして検出可能とするジョセフソン接合配線 5 a とがモノシリック体として各部の配置関係が固定されて形成され、光子を安定的に検出させることができ、より実用的である。

また、超伝導ストリップ線 1 自身が前記超伝導ループを構成するため、磁束を捉え易く、変形例における前記超伝導ループ外から飛散する磁束を検出する構成よりも、高い検出感度で磁束を検出することができ、より実用的である。

また、超伝導ストリップ線 1 を含む前記光子検出部を構成する配線と、前記コンパレータ回路（超伝導配線 3 とジョセフソン接合配線 5 a）を構成する配線とを同じ超伝導材料とすれば、製造効率を向上させることができるとともに微細加工を容易化させることができ、より実用的である。

[0020] J T L 回路 4 は、S F Q 論理回路 6 と接続される。S F Q 論理回路 6 としては、特に制限はなく、例えば、参照時間信号の入力時間と、磁束の検出に伴い前記 S F Q コンパレータ回路（J T L 回路 4）から出力される出力信号の入力時間との時間差を計測し、前記時間差から前記出力信号をデジタルデ

ータ化する時間デジタル変換器（TDC；Time-to-Digital Converter）が挙げられる。

前記TDCとしては、特に制限はなく、公知のものから適宜選択して用いることができるが、極低温環境での動作のため、本発明者らが開発した下記参考文献に記載のSFQ回路で構成されるSFQ-TDCが好ましい。前記SFQ-TDCでは、タイミングジッタを2.5ピコ秒以下で信号処理を行うことができる。

前記TDCによりデジタルデータ化された信号は、装置外の室温環境下にあるデバイスに伝送される。一般に広帯域伝送が可能なケーブルは、熱の良導体でもあるため、超高速パルスを室温環境下まで伝送することが困難である。一方、デジタルデータ化された信号を伝送するためのケーブルは、MHz帯域伝送のものでよく、室温環境下まで信号を伝送させることができる。

参考文献：K. Nakamiya, T. Nishigai, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Terai and S. Yorozu, "Improvement of time resolution of the double-oscillator time-to-digital converter using SFQ circuits," Physica C 463, 1088 (2007).

[0021] なお、光子検出装置10は、超伝導動作を含むため、図示しない冷凍器等に収容されて用いられる。

[0022] ー動作原理及び動作方法ー

光子検出装置10の動作原理及び動作方法について説明する。

先ず、前記光子検出部では、バイアス電流を流した状態の超伝導ストリップ線1の検出面に光子が入射されると、磁束-反磁束対が解離（Unbinding）する。磁束-反磁束対の発生は、超伝導秩序パラメータの変動に起因するものと考えられる。図3（a）は、超伝導ストリップ線に光子が入射された際にの超伝導秩序パラメータの時間的変動をシミュレートした結果を示す図である。この図3（a）に示すように、光子が入射されてから5ピコ秒程度だけ遅れて超伝導秩序パラメータが振動することが分かる。

[0023] 図3（b）は、磁束-反磁束対の解離状況を示す説明図である。超伝導秩

序パラメータの振動によって超伝導ストリップ線1に発生した磁束-反磁束対は、超伝導ストリップ線1を流れるバイアス電流によってローレンツ力を受けて磁束-反磁束対に解離し、それぞれ超伝導ストリップ線1中からバイアス電流の流れる方向と直交する方向、即ち、超伝導ストリップ線1の幅方向に磁束-反磁束対が排除され、これらが超伝導ストリップ線1から飛散する。

なお、このとき超伝導ストリップ線1を流れるバイアス電流が臨界電流近くまで十分に大きいと、超伝導ストリップ線1の幅方向に完全な常伝導領域が形成される。従来技術であるSSPDでは、このような超伝導ストリップ線1の幅方向に完全な常伝導領域を形成させることによって電流パルスを出力することとしているが、これを換言すれば、超伝導ストリップ線1の臨界電流近くまで十分に大きいバイアス電流を流す必要があることを意味している。

[0024] 図3(c)は、光子が入射した際に超伝導ストリップ線中に起きる現象とバイアス電流との関係を示す図である。該図3(c)に示すように、通信波長帯(1, 550nm)の光子(エネルギー約1eV)の入射に対して、超伝導ストリップ線1の幅方向が完全な常伝導状態となるためには、臨界電流値に対して値が90%以上の大きさのバイアス電流が必要となることが分かる(図中、右上の領域)。

一方、臨界電流値に対して値が85%以下のバイアス電流を流す領域(図中、中央の領域)では、超伝導ストリップ線1の幅方向が完全な常伝導状態とならないものの、磁束-反磁束対を発生させることができる。また、臨界電流値に対して値が60%未満のバイアス電流を流す領域(図中、左下の領域)では、磁束-反磁束対が発生しない。

臨界電流値に対して値が90%以上の大きさのバイアス電流を流す領域では、超伝導秩序パラメータが不安定であり、ダークカウントを発生させやすい。

光子検出装置10では、超伝導ストリップ線1の臨界電流値に対し、値が

60%～85%の大きさのバイアス電流を超伝導ストリップ線1に流すことで通信波長帯の光子をダークカウントフリーで検出することができる。

[0025] 再び図2を参照しつつ、説明をする。

超伝導ストリップ線1から飛散する磁束は、単一磁束量子として超伝導ストリップ線1と超伝導配線3とジョセフソン接合配線5aとで構成される前記超伝導ループに捉えられ、前記超伝導ループにパルス状のループ電流を発生させる。このときJTL回路4の初段を構成し配線内にジョセフソン接合（図2中、×で示す接合）を有するジョセフソン接合配線5aにバイアス電流を流しておく、ループ電流とバイアス電流との和がジョセフソン接合配線5aのジョセフソン接合の臨界電流値を一時的に超え、ジョセフソン接合が常伝導転移し、ジョセフソン接合配線5a上にSFQパルスが発生する。

ジョセフソン接合5aを流れるSFQパルスは、回路の右側（出力側）に電流を発生させる。回路の右側（出力側）に発生した電流は、JTL回路4の次段を構成し配線内にジョセフソン接合（図2中、×で示す接合）を有するジョセフソン接合配線5bにバイアス電流を流しておく、ジョセフソン接合の臨界電流値を一時的に超え、ジョセフソン接合が常伝導転移し、ジョセフソン接合配線5b上にジョセフソン接合配線5a上のSFQパルスが伝播されるように発生する。なお、発生するSFQパルスの応答時定数は、一般のJTL回路でも数ピコ秒とすることができる。

JTL回路4を伝播するSFQパルスは、SFQ論理回路6に出力され、デジタルデータ化され、適当なケーブルにより室温環境下まで伝送される。SFQ論理回路6として、前記SFQ-TDCを用いれば、タイミングジッタを2.5ピコ秒以下として信号処理を行うことができる。

[0026] なお、前述の光子検出装置10では、JTL回路4の初段を構成するジョセフソン接合配線5aを前記コンパレータ回路の構成部材として説明をしたが、JTL回路4自体は、ジョセフソン接合配線5a上に発生したSFQパルスを伝送させる手段であり、前記コンパレータ回路と分けて考えることができる。

したがって、更なる変形例として、図2中のJTL回路4を持たず、超伝導ストリップ線1を含む前記光子検出部と、超伝導配線3、ジョセフソン接合配線5aに加え、ジョセフソン接合配線5aにバイアス電流を供給する公知のバイアス電流供給手段、及びジョセフソン接合配線5a上に発生するSFQパルスを検出する公知の検出手段で構成されたコンパレータ回路とで、光子検出装置を構成してもよい。

[0027] 以上のように、(1)光子検出装置10では、超伝導ストリップ線1を光子検出に用いるため、APDのようなアフターパルスがない。(2)また、SSPDに比べ、低いバイアス電流/臨界電流比で動作可能であるため、ダークカウントの発生を抑えた光子検出を行うことができる。(3)また、超伝導ストリップ線1における微弱な電流パルスを光子検出原理としないため、SSPDに配される低ノイズアンプ(図1(a)参照)を用いる必要がなく、原理的に測定系の低ジッタ化を可能とする。(4)更に、SSPDでは、超伝導ストリップ線1の立下り時間 τ が超伝導ストリップ線のインダクタンスLによる制限により(図1(a)参照)、応答時定数が数十ナノ秒とされ、光子の計数率が高々数百MHz程度であるところ、光子検出装置10では、超伝導ストリップ線1のインダクタンスLによる計数率の制限を受けず、応答時定数は、磁束発生 の時間幅(図3(a)参照)又はSFQパルスの立下り時間(図2参照)によって決定され、いずれにしても数ピコ秒とされる。これは、SSPDに比べ計数率を3桁以上向上可能であることを意味する。

[0028] <第2の実施形態>

次に、本発明の第2の実施形態について説明する。図4は、本発明の第2の実施形態の概要を示す説明図である。

光子検出装置50は、主として超伝導ストリップ線1a~1d、JTL回路4a~4d、統合入力回路(CB; Confluence Buffer)7a~7c、SFQ論理回路6、光導波路8b、光子検出部、コンパレータ回路が基板8a上にモノシリックに形成されて構成される。なお、超伝導

ストリップ線 1 a ~ 1 d、J T L 回路 4 a ~ 4 d、S F Q 論理回路 6、前記光子検出部、前記コンパレータ回路の各部の詳細は、光子検出装置 1 0 における超伝導ストリップ線 1、J T L 回路 4、S F Q 論理回路 6、前記光子検出部、前記コンパレータ回路と同様であるため、個々の構成及び動作に関する説明を省略する。

[0029] 超伝導ストリップ線 1 a ~ 1 d は、光導波路 8 b 上に形成される。光導波路 8 b としては、例えば、公知のシリコン導波路等から構成される。

光導波路 8 b は、例えば、図中下端側から光ファイバ等の光供給源により光が導入され、矢印方向に光が導波可能とされる。光導波路 8 b 内に導波される光は、超伝導ストリップ線 1 a ~ 1 d に入射されることとなる。

このように構成すると、例えば、光供給源から光子を出射して、直接、超伝導ストリップ線 1 a に光子を入射させるよりも、高い確率で超伝導ストリップ線 1 a に光子を入射させることができる。

[0030] また、光導波路 8 b 上には、4 つに分割された超伝導ストリップ線 1 a ~ 1 d が配される。

これら超伝導ストリップ線 1 a ~ 1 d に代えて、1 本の長大な超伝導ストリップ線を配する場合、1 0 μ m 程度の長さで約 9 0 % の光子吸収率を実現することができ、1 μ m 短くなるごとに光子吸収率が 1 d B ずつ低下する。

しかしながら、このような長大な超伝導ストリップ線を用いると、超伝導ループにおける電流感度が低下することがある。磁束が作るループ電流 I_L の大きさは、次式、 $I_L = \Phi / L$ で表される。式中、 Φ は、単一磁束量子； 2×10^{-15} W b を示し、 L は、超伝導ストリップ線のインダクタンスを示す。J T L 回路の磁束検出感度として、 I_L は、一定以上の値であることが求められるが、超伝導ストリップ線が長いと L が大きくなる。

そのため、図 4 に示すように長さが比較的短い超伝導ストリップ線（1 a ~ 1 d）を光導波路 8 b の光導波方向に沿って複数配し、これら長さが短い超伝導ストリップ線全体で長さが長い 1 本の超伝導ストリップ線の役割を担わせることが有利となる。

[0031] 光子検出装置50では、個々の超伝導ストリップ線1a~1dに対応して光子検出部（不図示）とJTL回路（JTL回路4a~4d）が複数配され、更に、個々のJTL4a, 4bから出力されるそれぞれの出力信号が統合して入力されるCB回路7a, 同様に個々のJTL4c, 4dから出力されるそれぞれの出力信号が統合して入力されるCB回路7bが配され、更に、個々のCB回路7a, 7bから出力されるそれぞれの出力信号が統合して入力されるCB回路7cが配される。超伝導ストリップ線1a~1d, JTL回路4a~4d, CB回路7a~7c, SFQ論理回路6及び光導波路8bで1つのモノシリックな光検出アレイ9を構成する。

各CB回路7a~7cとしては、公知のSFQ回路に用いられる回路構成から適宜選択して構成することができる。

なお、基板8aとしては、例えば、酸化シリコン基板等の公知の基板を用いることができる。また、SFQ論理回路6から出力されるデジタルデータは、図示しないケーブル等により、室温環境下のデバイスまで伝送される。

[0032] このように構成される光子検出装置50では、超伝導ストリップ線1a~1dの少なくともいずれかで光子を吸収することができれば、これを検出することができ、飛躍的に光子の検出効率を向上させることができる。

[0033] <第3の実施形態>

次に次に、本発明の第3の実施形態について説明する。図5は、本発明の第3の実施形態の概要を示す説明図である。

図5に示す光子検出装置100は、図4に示す光子検出装置50における光子検出アレイ9が同一基板上に複数配されたモノシリックデバイスとして構成とされる。これ以外は、光子検出装置50と同様であるため、説明を省略する。

[0034] このような光子検出装置100によれば、独立した光ファイバ等の光供給源からの光子を各光子検出アレイ9で独立して検出することができ、複数の情報源からの通信信号を処理することができる。例えば、量子もつれ量子暗号通信の基本的なセットアップである、偏光(4)×二波長多重化(2)×

送受信（２）のセットアップでは、合計１６の通信信号を独立して処理することが求められるが、光子検出アレイ９を同一基板上に１６アレイ配することとすれば、こうした通信分野にも適用することができる。

符号の説明

- [0035] 1, 1 a ~ 1 d 超伝導ストリップ線
 2 電流源
 3 超伝導配線
 4, 4 a ~ 4 d J T L 回路
 5 a, 5 b ジョセフソン接合配線
 6 S F Q 論理回路
 7 a ~ 7 c C B 回路
 8 a 基板
 8 b 光導波路
 9 光子検出アレイ
 1 0, 5 0, 1 0 0 光子検出装置

請求の範囲

- [請求項1] 板面が光子検出面とされる長板状の超伝導ストリップ線及び前記超伝導ストリップ線にバイアス電流を供給するバイアス電流供給手段を有する光子検出部と、
- 光子検出時に前記超伝導ストリップ線から飛散する磁束を検出可能な単一磁束量子コンパレータ回路と、
- を有することを特徴とする光子検出装置。
- [請求項2] 単一磁束量子コンパレータ回路が、少なくとも配線内にジョセフソン接合を有するジョセフソン接合配線と、前記ジョセフソン接合配線—超伝導ストリップ線間を電氣的に接続する超伝導配線とを有し、
- 前記超伝導ストリップ線と前記超伝導配線と前記ジョセフソン接合配線とで磁束を検出可能な超伝導ループが構成される請求項1に記載の光子検出装置。
- [請求項3] バイアス電流供給手段が超伝導ストリップ線の臨界電流値に対し、値が60%～85%の大きさのバイアス電流を前記超伝導ストリップ線に流す手段である請求項1から2のいずれかに記載の光子検出装置。
- [請求項4] 検出対象の光子が導波される光導波路上に超伝導ストリップ線が配される請求項1から3のいずれかに記載の光子検出装置。
- [請求項5] 光導波路の光導波方向に沿って超伝導ストリップ線が複数配されるとともに、個々の前記超伝導ストリップ線に対応して光子検出部と単一磁束量子コンパレータ回路が複数配され、更に、個々の前記単一磁束量子コンパレータ回路から出力されるそれぞれの出力信号が統合して入力される統合入力回路が配される請求項4のいずれかに記載の光子検出装置。
- [請求項6] 更に、参照時間信号の入力時間と、磁束の検出に伴い単一磁束量子コンパレータ回路又は統合入力回路から出力される出力信号の入力時間との時間差を計測し、前記時間差から前記出力信号をデジタルデー

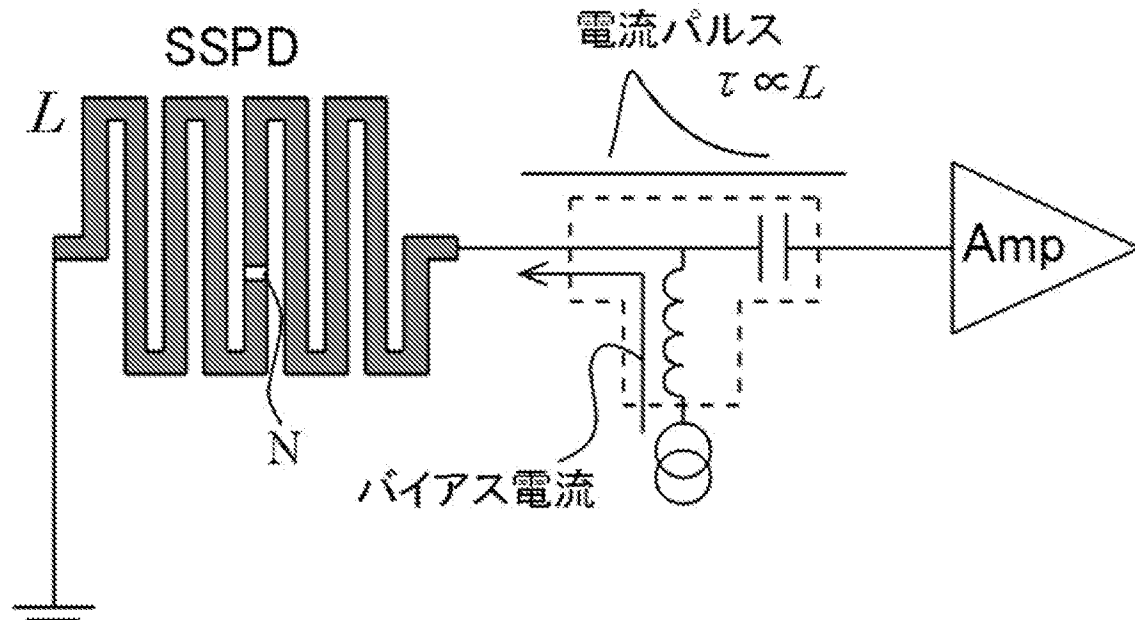
タ化する時間デジタル変換器を有する請求項 1 から 5 のいずれかに記載の光子検出装置。

[請求項7] 請求項 1 から 6 のいずれかに記載の光子検出装置を用いて光子を検出する方法であって、

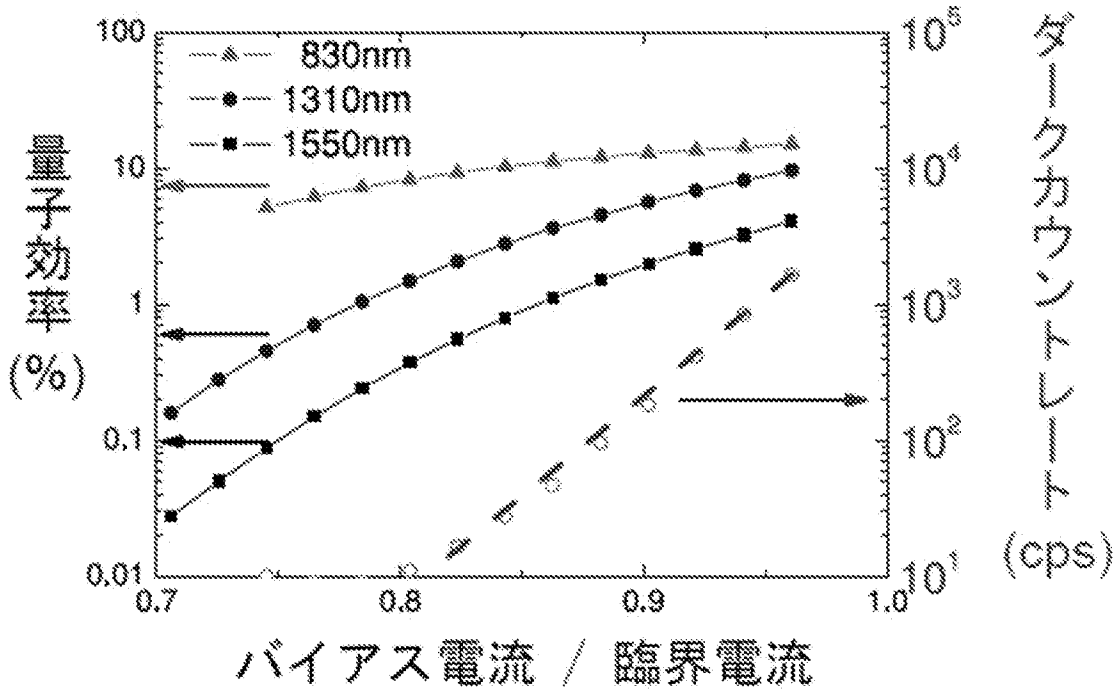
バイアス電流を超伝導ストリップ線に流した状態で検出面に前記光子を入射させ、前記光子の入射により前記超伝導ストリップ線から飛散する磁束を単一磁束量子コンパレータ回路で検出することで、前記光子を検出することを特徴とする光子検出方法。

[請求項8] 超伝導ストリップ線の臨界電流値に対し、値が 60%～85%の大きさのバイアス電流を前記超伝導ストリップ線に流す請求項 7 に記載の光子検出方法。

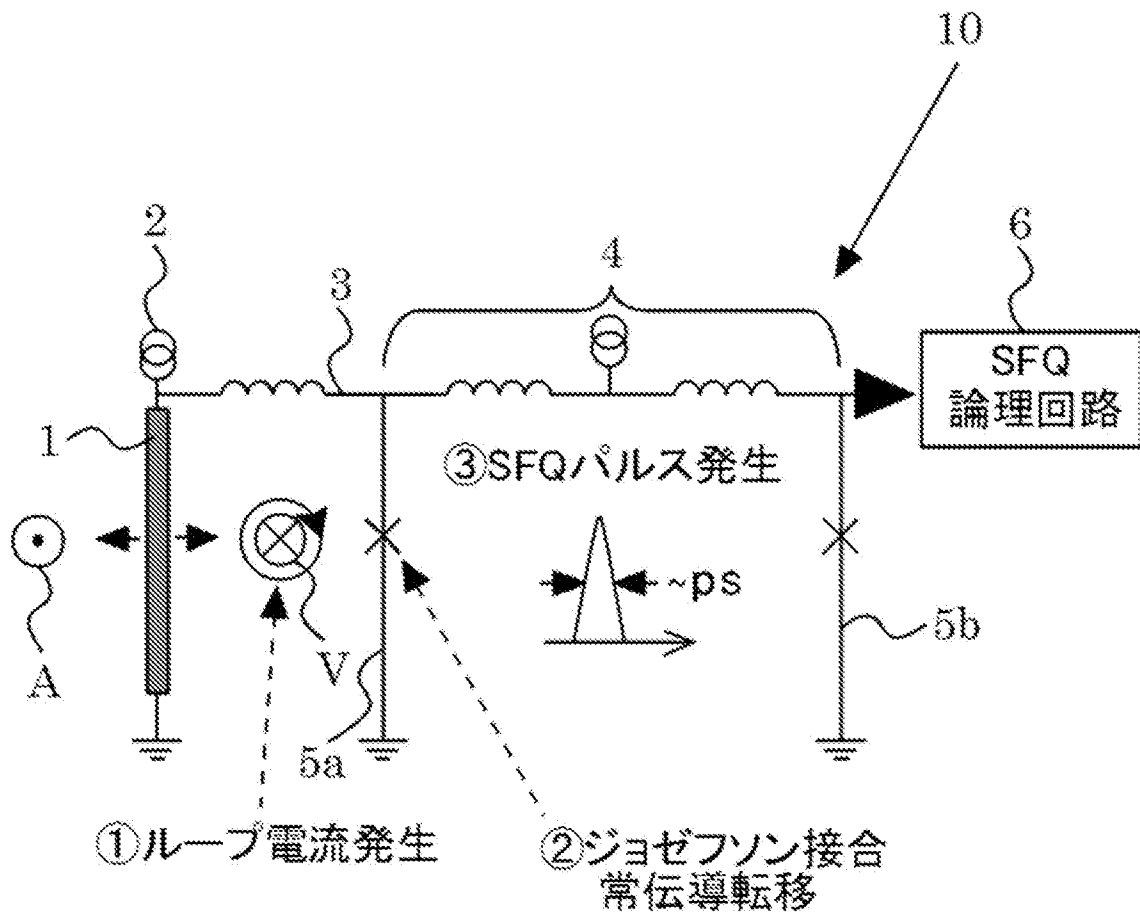
[図1(a)]



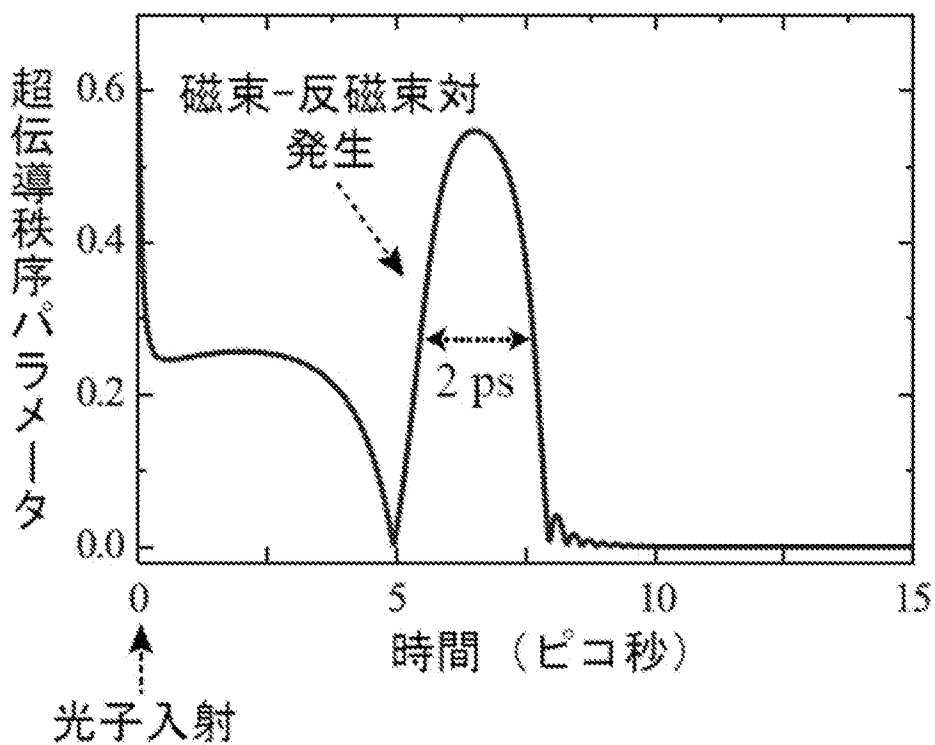
[図1(b)]



[図2]

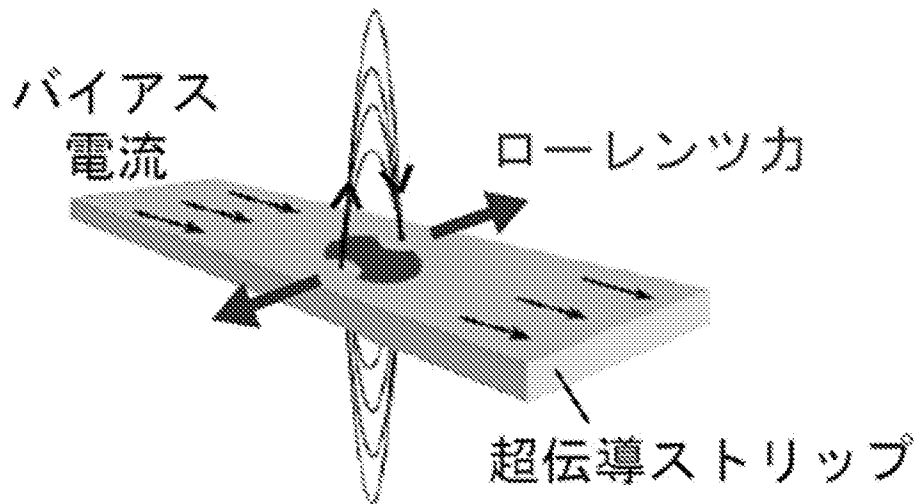


[図3(a)]

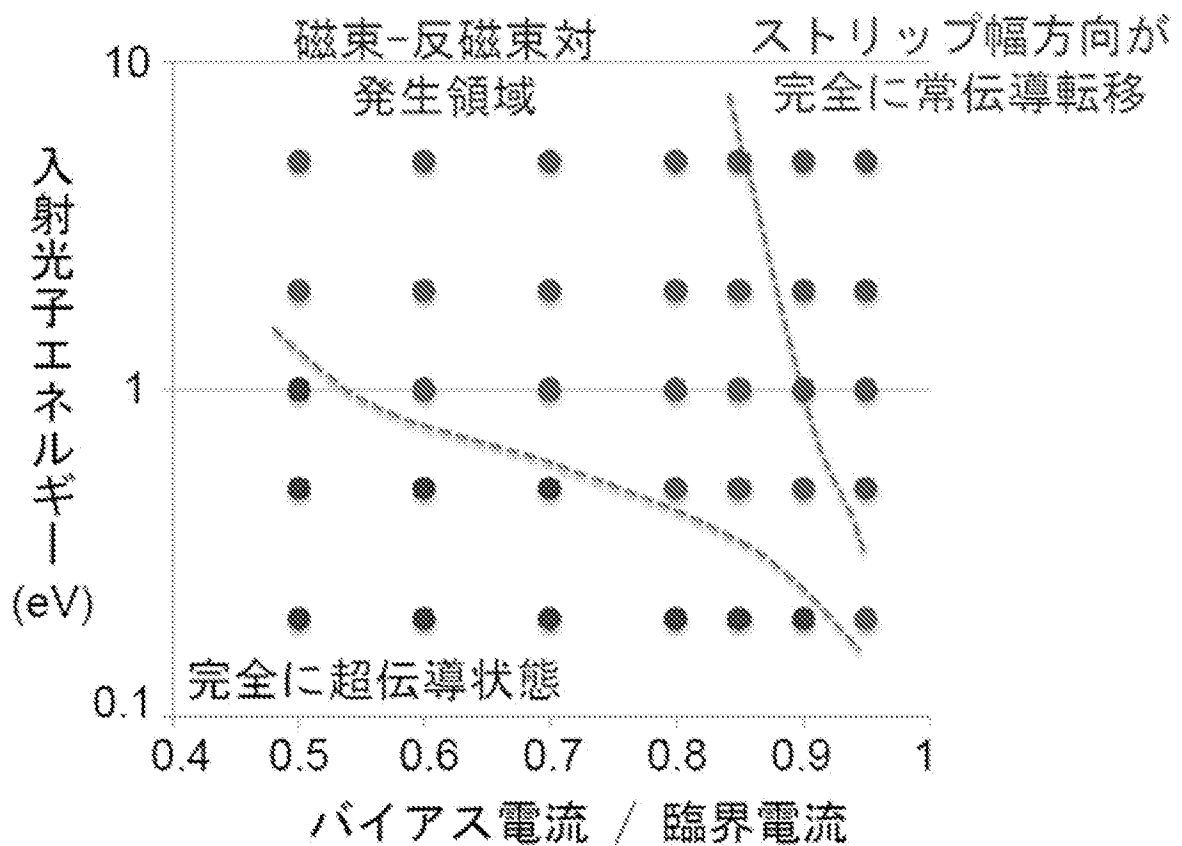


[図3(b)]

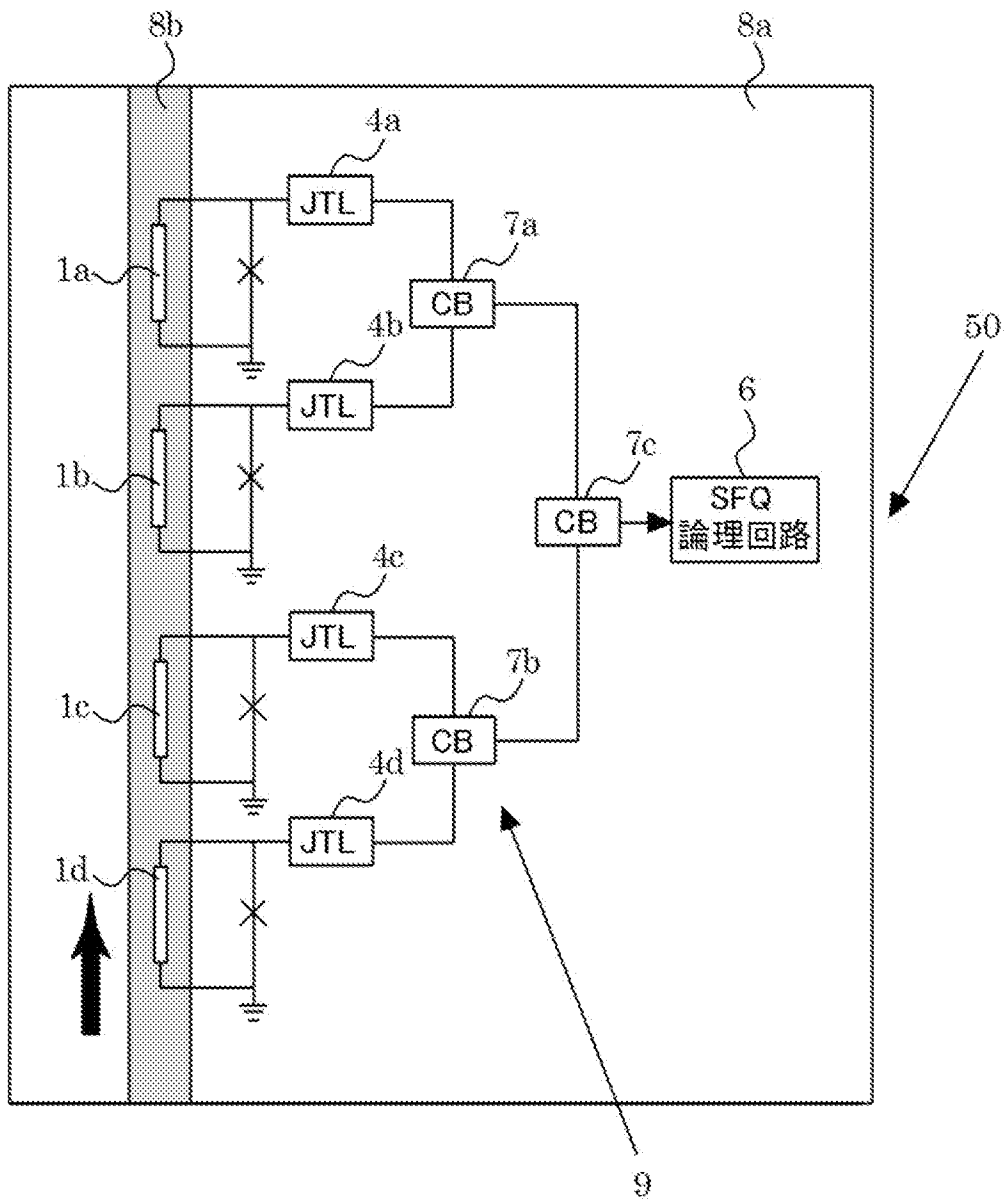
磁束-反磁束対 unbinding



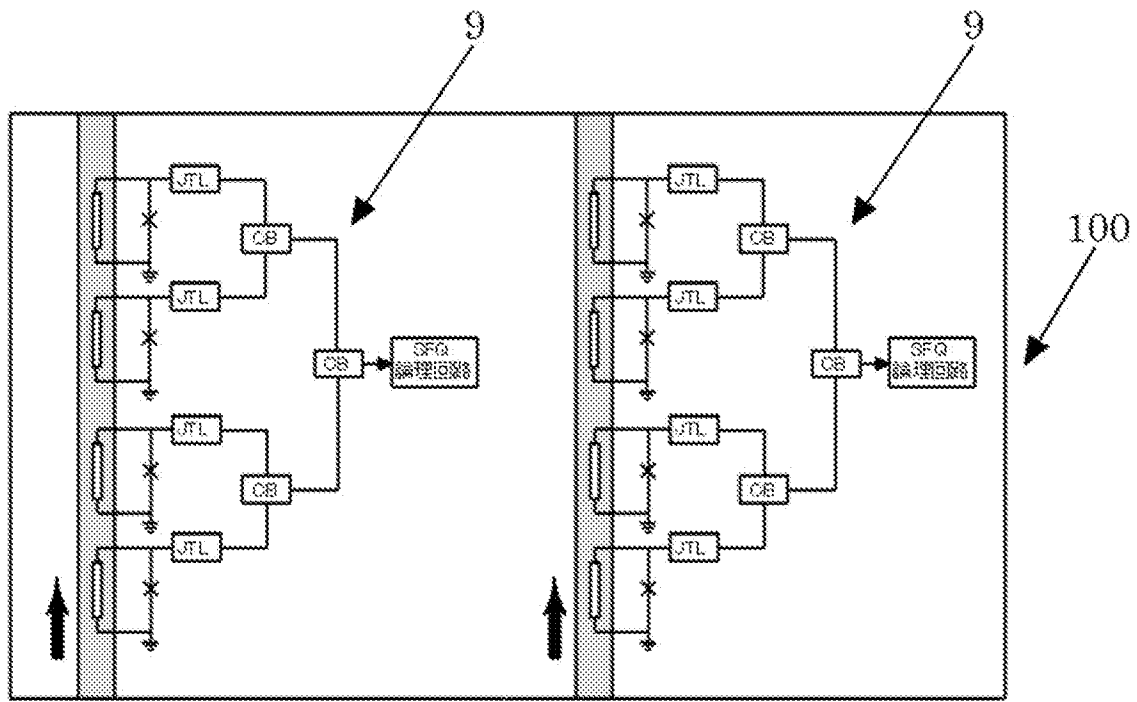
[図3(c)]



[図4]



[図5]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/067747

<p>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>G01J1/02(2006.01) i, H01L39/00(2006.01) i</i></p> <p>According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC</p>											
<p>B. FIELDS SEARCHED</p> <p>Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) <i>G01J1/00-1/60, H01L39/00, G01T1/00-1/16, G01T1/167-7/12</i></p> <p>Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched</p> <table style="width:100%; border:none;"> <tr> <td style="width:33%;"><i>Jitsuyo Shinan Koho</i></td> <td style="width:33%;"><i>1922-1996</i></td> <td style="width:33%;"><i>Jitsuyo Shinan Toroku Koho</i></td> <td style="width:33%;"><i>1996-2016</i></td> </tr> <tr> <td><i>Kokai Jitsuyo Shinan Koho</i></td> <td><i>1971-2016</i></td> <td><i>Toroku Jitsuyo Shinan Koho</i></td> <td><i>1994-2016</i></td> </tr> </table> <p>Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) <i>JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII), IEEE Xplore, Scopus</i></p>			<i>Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1922-1996</i>	<i>Jitsuyo Shinan Toroku Koho</i>	<i>1996-2016</i>	<i>Kokai Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1971-2016</i>	<i>Toroku Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1994-2016</i>	
<i>Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1922-1996</i>	<i>Jitsuyo Shinan Toroku Koho</i>	<i>1996-2016</i>								
<i>Kokai Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1971-2016</i>	<i>Toroku Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1994-2016</i>								
<p>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width:10%;">Category*</th> <th style="width:70%;">Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th style="width:20%;">Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align:center;">Y A</td> <td>JP 2004-363485 A (Japan Science and Technology Agency), 24 December 2004 (24.12.2004), paragraphs [0027] to [0034]; fig. 1 (Family: none)</td> <td style="text-align:center;">1, 4, 6-7 2-3, 5, 8</td> </tr> <tr> <td style="text-align:center;">Y</td> <td>BERDIYOROV, G. R. et al., Spatially dependent sensitivity of superconducting meanders as single-photon detectors, <i>Appl. Phys. Lett.</i>, 2012.06.25, Volume 100, Issue 26, pp. 262603-1 - 262603-4, particularly, p. 262603-2 right column, 2nd paragraph, Fig. 3</td> <td style="text-align:center;">1, 4, 6-7</td> </tr> </tbody> </table>			Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	Y A	JP 2004-363485 A (Japan Science and Technology Agency), 24 December 2004 (24.12.2004), paragraphs [0027] to [0034]; fig. 1 (Family: none)	1, 4, 6-7 2-3, 5, 8	Y	BERDIYOROV, G. R. et al., Spatially dependent sensitivity of superconducting meanders as single-photon detectors, <i>Appl. Phys. Lett.</i> , 2012.06.25, Volume 100, Issue 26, pp. 262603-1 - 262603-4, particularly, p. 262603-2 right column, 2nd paragraph, Fig. 3	1, 4, 6-7
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.									
Y A	JP 2004-363485 A (Japan Science and Technology Agency), 24 December 2004 (24.12.2004), paragraphs [0027] to [0034]; fig. 1 (Family: none)	1, 4, 6-7 2-3, 5, 8									
Y	BERDIYOROV, G. R. et al., Spatially dependent sensitivity of superconducting meanders as single-photon detectors, <i>Appl. Phys. Lett.</i> , 2012.06.25, Volume 100, Issue 26, pp. 262603-1 - 262603-4, particularly, p. 262603-2 right column, 2nd paragraph, Fig. 3	1, 4, 6-7									
<p><input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.</p>											
<p>* Special categories of cited documents:</p> <table style="width:100%; border:none;"> <tr> <td style="width:50%; vertical-align: top;"> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> </td> <td style="width:50%; vertical-align: top;"> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p> </td> </tr> </table>			<p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>							
<p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>										
<p>Date of the actual completion of the international search 22 August 2016 (22.08.16)</p>		<p>Date of mailing of the international search report 30 August 2016 (30.08.16)</p>									
<p>Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan</p>		<p>Authorized officer</p> <p>Telephone No.</p>									

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/067747

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	YAMASHITA, T. et al., Origin of intrinsic dark count in superconducting nanowire single-photon detectors, Appl. Phys. Lett., 2011.10.17, Volume 99, Issue 16, pp. 161105-1 - 161105-3, particularly, p. 161105-2 right column, 3rd paragraph	1, 4, 6-7
Y	SAHIN, D. et al., Waveguide Nanowire Superconducting Single-Photon Detectors Fabricated on GaAs and the Study of Their Optical Properties, IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, 2015.03, Vol. 21, No. 2, Page. 3800210, 1-10, particularly, 'IV. WAVEGUIDE SUPERCONDUCTING SINGLE PHOTON DETECTORS', 'A. Desing'	4, 6-7
Y	JP 2014-529923 A (Koninklijke Philips N.V.), 13 November 2014 (13.11.2014), claim 6 & US 2014/0175294 A1 claim 6 & WO 2013/018006 A1 & CN 103733609 A	6-7

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） Int.Cl. G01J1/02(2006.01)i, H01L39/00(2006.01)i		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） Int.Cl. G01J1/00-1/60, H01L39/00, G01T1/00-1/16, G01T1/167-7/12		
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2016年 日本国実用新案登録公報 1996-2016年 日本国登録実用新案公報 1994-2016年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語） JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII), IEEE Xplore, Scopus		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 2004-363485 A (独立行政法人 科学技術振興機構) 2004.12.24, [0027]-[0034], 図1 (ファミリーなし)	1, 4, 6-7 2-3, 5, 8
Y	BERDIYOROV, G. R. et al., Spatially dependent sensitivity of superconducting meanders as single-photon detectors, Appl. Phys. Lett., 2012.06.25, Volume 100, Issue 26, pp. 262603-1 - 262603-4, 特に p. 262603-2 右欄 第2段落, Fig. 3	1, 4, 6-7
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 22.08.2016	国際調査報告の発送日 30.08.2016	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 塚本 丈二 電話番号 03-3581-1101 内線 3258	2W 3304

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリ*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	YAMASHITA, T. et al., Origin of intrinsic dark count in superconducting nanowire single-photon detectors, Appl. Phys. Lett., 2011.10.17, Volume 99, Issue 16, pp. 161105-1 - 161105-3, 特に p. 161105-2 右欄 第3段落	1, 4, 6-7
Y	SAHIN, D. et al., Waveguide Nanowire Superconducting Single-Photon Detectors Fabricated on GaAs and the Study of Their Optical Properties, IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, 2015.03, Vol. 21, No. 2, Page. 3800210, 1-10, 特に「IV. WAVEGUIDE SUPERCONDUCTING SINGLE PHOTON DETECTORS」の「A. Desing」	4, 6-7
Y	JP 2014-529923 A (コーニンクレッカ フィリップス エヌ ヴェ) 2014.11.13, [請求項6] & US 2014/0175294 A1, 請求項6 & WO 2013/018006 A1 & CN 103733609 A	6-7