

令和元年6月25日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14261

研究課題名（和文）量子限界に挑む新原理の超伝導単一光子検出器の実証

研究課題名（英文）Demonstration of a superconducting single photon detector of new principle

研究代表者

馬渡 康德 (Mawatari, Yasunori)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：70358068

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：従来の単一光子検出器の性能を遥かに凌駕するような、超高速で動作する新原理の超伝導単一光子検出器の実証を目指した研究開発を行った。新型検出器では、直線状の超伝導ストリップが単一光子を吸収したときに発生する量子化磁束を、超伝導単一磁束量子回路により検出する。常伝導転移するときの電圧パルスを計数する従来の超伝導ストリップ検出器に比べて、新型検出器では3桁近い計数率の向上が期待される。正常動作する検出システムの作製が困難であった等の理由により、研究期間内に原理実証には至らなかったが、新設計に基づく検出システムはすでに完成しており、今後実証する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子暗号通信に必要な高性能の単一光子検出器として、超伝導ストリップ光子検出器の研究開発が進展しているが、テレビ会議のような高い安全鍵生成率による高度な量子暗号通信のためには、桁違いの計数率の向上など飛躍的高性能化が必要である。本研究で提案している新型検出システムが実証されれば、このような高度な量子暗号通信の実現に向けて大きく前進することができると考えられる。

研究成果の概要（英文）：We proposed a new single-photon detectors using superconducting nanostrips with single-flux-quantum (SFQ) circuits. In the new detector, the photon absorption in superconducting nanostrips gives rise to the excitation of vortices, which are detected by SFQ circuits. Because the characteristic time scales of the vortex motion and the SFQ detection is on the order of ps, the count rate of the new detector is about ~100 times larger than that of the conventional single-photon detectors using the normal transition of the superconducting nanostrips. Although we could not succeed in demonstrating the new detector, we will try to do it soon.

研究分野：工学

キーワード：超伝導 単一光子検出器 量子化磁束 超伝導量子化磁束回路 量子暗号通信

1. 研究開始当初の背景

完全な秘匿通信として期待されている量子暗号通信では、情報担体である単一光子を検出する高性能検出器が必要である。超伝導ストリップを用いた単一光子検出器は、高速、低雑音、かつゲート動作が不要であること等により、半導体材料を用いた検出器よりも単純なシステムで優れた性能が得られ、長距離の量子暗号通信に向けて研究開発が急速に進展している。しかし、テレビ会議のような極めて高い安全鍵生成率を要する量子暗号通信を実現するためには、従来の超伝導単一光子検出器よりさらに高速(高い計数率)、高感度(高い量子効率)、かつ低雑音(低い暗計数)の検出器が望まれていた。このような従来の超伝導単一光子検出器の検出機構として、次のような物理機構が知られている。すなわち、超伝導ストリップが光子を吸収すると、局所的に超伝導電子密度が抑制された領域で量子化磁束(渦糸)が発生し、バイアス電流により駆動された量子化磁束の流れにともなって発熱して温度上昇し、超伝導ストリップが常伝導転移することで電圧パルスが生じる、という検出機構である。

超伝導ストリップが光子を吸収したときに発生する量子化磁束は、超高速(\sim ps)で作動する超伝導単一磁束量子(SFQ)回路により検出可能であることが知られているので、我々は、光子吸収により生じた量子化磁束を SFQ 回路により直接検出するという新原理により、超高速の単一光子検出器が実現できるとの着想に至り、新原理に基づく革新的な超伝導単一光子検出器として特許出願(特願 2015-123764「光子検出装置及び光子検出方法」)を行った。この新型超伝導検出器の性能は、半導体検出器はもちろん従来型の超伝導単一光子検出器の性能も大きく凌駕すると期待される。

2. 研究の目的

量子暗号通信に必要な高性能の単一光子検出器として、超伝導ストリップ光子検出器の研究開発が進展しているが、高い安全鍵生成率による高度な量子暗号通信のためには、桁違いの計数率の向上など飛躍的高性能化が必要である。本研究では、従来型の単一光子検出器の性能を飛躍的に凌駕できる新原理に基づく革新的な超伝導単一光子検出器の原理実証を行うことを目的とした。新型検出器では、直線状の超伝導ストリップが単一光子を吸収したときに発生する量子化磁束を、単一磁束量子(SFQ)回路により検出する(特許出願済)。こうして、高い計数率、高い量子効率、極めて短い時間ジッタ、かつ低い暗計数率を実現可能にする、量子限界に迫る究極的な単一光子検出器の原理を実証し、将来の完全秘匿のリアルタイム・テレビ会議を可能とする量子暗号通信技術の実現に資することを目指した。

3. 研究の方法

新型超伝導単一光子検出器の原理実証のため、主に次の3項目について研究を行った。

(1) 検出機構に関する数値シミュレーション

通信波長帯(1550nm)の単一光子により量子化磁束が励起される過程について、時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式と熱拡散方程式とを連成した数値計算を行い、基本原理の実証実験を再現するようなシミュレーションを行った。

(2) 検出システム作製と特性評価

既存の超伝導デバイス評価用冷凍機を改造して、光ファイバの導入を可能にするとともに SFQ 回路の正常動作のための磁気シールドを施して、特性評価のための環境を整備した。また、超伝導ナノストリップと SFQ 回路を集積したモノリシック検出システムを作製し、光照射をしない条件で SFQ 回路動作の特性評価を行った。

(3) 検出システム再設計と作製

正常動作する検出システムを歩留まり良く作製することが難しく、作製方法や設計の再検討を行い、新設計のもとに検出システムの作製を行った。

4. 研究成果

(1) 数値シミュレーション

幅が数百 nm の超伝導 Nb ナノストリップにバイアス電流を流し、光子を吸収したときに量子化磁束が発生する過程について、TDGL 方程式と熱拡散方程式を連成して数値的に解くシミュレーションを行った。光子を吸収する初期条件として、光子エネルギーに相当する発熱が起こると仮定してシミュレーションを行ったところ、磁束と反磁束(反対向きの量子化磁束)の対が発生し、バイアス電流によって駆動されることにより、磁束・反磁束対が引き離されて量子

化磁束が \sim ps 程度の時間スケールで運動する様子を確認した。また、従来型の超伝導単一光子検出器で電圧パルスが検出されるような常伝導転移に至るには \sim ns 程度の時間を要し、この新型検出器により原理的に超高速検出が可能であることを確認した。Nb の場合と NbN の場合とを比較したところ、NbN の場合に明確な量子化磁束が発生する様子が見られた。ただし、量子化磁束の発生は、超伝導電子密度(秩序パラメータの絶対値の 2 乗)の振る舞いにより定性的に確認したが、秩序パラメータの位相の特異点として量子化磁束の核を特定した方がより明確になると思われる。

(2) 検出システム作製と特性評価

Nb を用いた SFQ 回路の超伝導配線の一部を超伝導ナノストリップ構造に加工することにより、超伝導ナノストリップと SFQ 読み出し回路とを同一チップ上に集積化したモノリシック検出器システムを作製した。ナノストリップに光を照射しない状況で、図 1 のように、SFQ 回路の出力確率がバイアス電流とともに対数的に増加する実験結果が得られ、これは熱励起による量子化磁束の発生(ダークカウント)を示唆すると考えられる。しかし、このときの検出回路では、量子化磁束を捕捉しているかどうか明確ではない回路設計となっていたので、量子化磁束の検出に確証が持てなかった。また、それまで作製したいくつかの検出システムが正常に動作しない場合が多く、有効な実験データを得ることが非常に困難であった。そこで、デバイス作製工程を見直して歩留まりを向上させるとともに、検出システムの再設計を行うことにした。

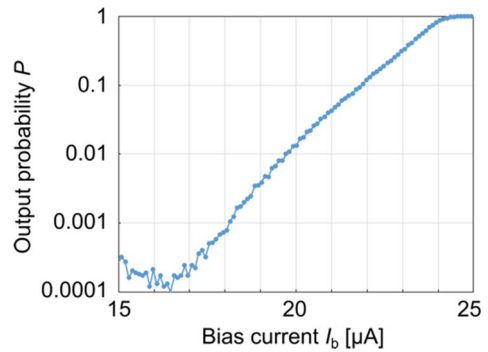


図 1: SFQ 回路の出力確率のバイアス電流依存性。

(3) 検出システム再設計と作製

超伝導ナノストリップと SFQ 回路を集積したモノリシック検出システムを構成する Nb 薄膜について、様々な物性値を評価した。試料の超伝導転移温度、磁場中抵抗の温度依存性、および転移温度付近におけるホール電圧等の測定より、コヒーレンス長、磁場侵入長、準粒子密度、および平均自由行程等を評価した。特に磁場侵入長は超伝導ナノストリップのインダクタンスを決定する重要なパラメータであり、その精密な値の評価により、検出システムの詳細設計が可能になった。また、超伝導ナノストリップと SFQ 回路がともに正常動作するようバイアス電流を分配する回路について再検討し、ナノストリップと SFQ 回路で構成される閉回路に配置していた抵抗を不要とし、その閉回路を(抵抗のない)超伝導ループとすることが可能であることがわかった。これにより、光子を吸収した超伝導ストリップに発生した量子化磁束が磁束量子化の条件を保ったまま閉回路に捉えられ、SFQ 回路で確実に検出される。さらに、デバイス作製工程の見直しにより、検出システムが正常動作する設計の見通しを得た。新たな設計と作製工程に基づいて、図 2 のように超伝導ナノストリップと SFQ 回路を集積したモノリシック検出システムを作製し、その基本動作を実験的に検証した。研究期間の終了までに光照射による単一光子検出の実証には至らなかったが、今後はその実証を進める予定である。

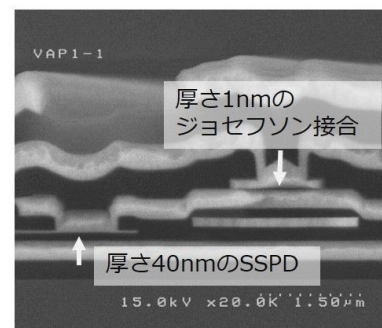
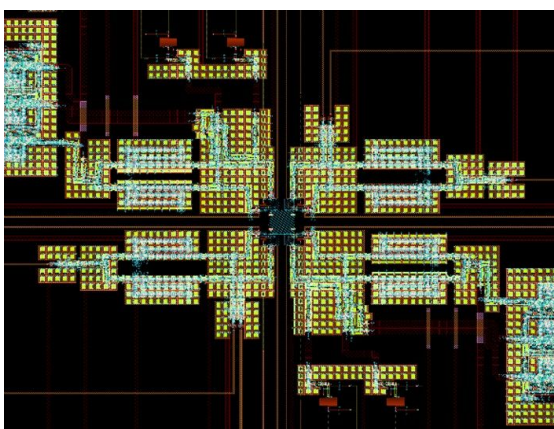


図 2: 新たに作製した検出システムの概要写真。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 7 件)

全伸幸, 阿部裕, 藤井剛, 冨塚裕真, 山梨裕希, 馬渡康徳, 吉川信行
“Study for the Operating Principle of Superconducting Strip Photon Detectors (SSPDs)”
30th International Symposium on Superconductivity (ISS 2017)
2017年12月15日

全伸幸, 馬渡康徳, 藤井剛, 阿部裕, 冨塚裕真, 吉川信行
「渦糸の直接捕捉による超高速超伝導ストリップ光子検出器の開発」
第25回渦糸物理国内会議
2017年11月29日

全伸幸, 藤井剛, 馬渡康徳, 浮辺雅宏, 阿部裕, 冨塚裕真, 吉川信行
「Gbps級の量子鍵生成率を目指した超伝導単一光子検出器の開発」
理研-産総研 第三回量子技術イノベーションコア Workshop
2017年11月13日

馬渡康徳
「超伝導体における量子化磁束ダイナミクスおよびTDGL方程式に関する最近の研究動向」
応用物理学会新領域グループ「量子化磁束動力学シミュレーション」夏セミナー
2017年8月17日

全伸幸, 阿部裕, 藤井剛, 冨塚裕真, 山梨裕希, 馬渡康徳, 吉川信行
“Study for the Operating Principle of Superconducting Strip Photon Detectors (SSPDs)”
17th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD 17)
2017年7月20日

全伸幸, 阿部裕, 馬渡康徳, 藤井剛, 佐野京佑, 山梨裕希, 吉川信行
「超伝導ストリップ光子検出器の原理実証のための研究」
第64回応用物理学会春季学術講演会
2017年3月15日

全伸幸, 阿部裕, 馬渡康徳, 藤井剛, 佐野京佑, 山梨裕希, 吉川信行
「超伝導ストリップ光子検出器の原理実証のための研究」
第64回応用物理学会春季学術講演会
2017年3月15日

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 光子検出器および光子検出方法
発明者: 全伸幸, 馬渡康徳, 藤井剛, 吉川信行
権利者: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所, 国立大学法人 横浜国立大学
種類: 特許
番号: PCT/JP2016/067747
出願年: 2016年
国内外の別: 国外

取得状況(計1件)

名称: 光子検出装置及び光子検出方法
発明者: 全伸幸, 馬渡康徳, 藤井剛, 吉川信行
権利者: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所, 国立大学法人 横浜国立大学
種類: 特許
番号: 特開 2018-100946
取得年: 2019年
国内外の別: 国内

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：全 伸幸

ローマ字氏名：ZEN Nobuyuki

所属研究機関名：国立研究開発法人 産業技術総合研究所

部局名：ナノエレクトロニクス研究部門

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：20455439

(2)研究分担者

研究分担者氏名：藤井 剛

ローマ字氏名：FUJII Go

所属研究機関名：国立研究開発法人 産業技術総合研究所

部局名：ナノエレクトロニクス研究部門

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：30709598

(3)連携研究者

連携研究者氏名：吉川 信行

ローマ字氏名：YOSHIKAWA Nobuyuki

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。