

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2007～2009

課題番号：19686010

研究課題名（和文）超伝導ナノ細線構造による超高速単一光子検出技術の研究

研究課題名（英文）Development of high speed single photon detector with superconducting nano wire structure

研究代表者

福田 大治（FUKUDA DAIJI）

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員

研究者番号：90312991

研究成果の概要（和文）：光の究極的な姿である単一光子を検出することが可能な新しい光検出技術の開発を行った。超伝導現象を応用して、光子が入射した時に破壊される超伝導状態を検出することで、光子の測定が可能となる。本研究では、高速かつ、高効率で単一光子を検出するために、超薄膜のデバイスを開発することに成功した。これにより、将来の情報通信産業を支える光検出技術や微弱光検出に基づく医療用分析技術などに応用可能な基礎技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a new single photon detection technique which is based on superconducting phenomena. Photons incident to a superconducting detector break a superconducting state in the detector, which results in a voltage signal. We have succeeded to develop ultra thin superconducting films to enhance photon detection sensitivity. This new technology can lead to a generation information technology, extremely low level photon detection, and a new medical analysis.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2008 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2009 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
総計	16,300,000	4,890,000	21,190,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：光計測、超伝導材料、超精密計測、量子効率、低温検出器

1. 研究開始当初の背景

量子ドットによる単一光子発生技術や量子光コンピュータの分野では、高精度に単一光子レベルの微弱な光パルスを検出・制御する技術が必須となっている。このためには、光パルス中のフォトン数を識別する能力、微弱な光信号を十分な強度で検出するための感度と低雑音性、および検出器に入射した単一光子を確実に検出するための高い量子効率

などの特性が光子検出器に要求される。申請者らは、これらの目的に叶う単一光子検出技術の実現を目指して、超伝導現象を微弱フォトンの検出に応用した光測定器の開発を行ってきた。この研究では、超伝導転移端マイクロカロリメータ(TES)を光子エネルギーの測定に応用したデバイスの開発を進め、素子の高速化と低反射率特性が期待できるチタニウム(Ti)を超伝導体に採用して、世界で初

めて Ti による 1550 nm フォトンを検出することに成功した。申請時点では、光子数分解能 2.0 eV、応答時定数 300 ns の性能が得られており、特に応答時定数については同種の検出器と比較して世界で 10 倍以上の高速性を達成している。この Ti- TES による光子検出器はエネルギー分解能を持つこと、すなわち、光パルス中の光子数識別能力を持つ点が最大の特徴であり、単一光子源の発光特性評価や量子光コンピュータにおける CNOT 量子ゲートなどを始めとして様々な分野への適用に向けた開発を現在進めているところである。

一方、量子情報通信やライダー計測等の分野では、GHz 以上の超高速性と ps 以下の低ジッタ性など、時間領域に対して高度な性能が検出器に要求されている。特に、1550 nm 通信波長帯のフォトンに対しては、これらの性能をすべて満足する技術が現状では存在しないため、上記分野においては、クロックレートや空間分解能に制限が生じるなど、フォトン検出に由来した深刻な問題が生じている。申請者らの TES による光子検出技術でも、カロリメータを検出原理としているため本質的に GHz 以上の速度を達成することは難しく、エネルギー領域で高度な計測ができて時間領域に関する情報は MHz 程度の周波数領域に限られてしまうという問題があった。このエネルギー領域と時間領域の不完備性は、様々な光応用分野における発展を計測面から支えていく上では、今後深刻な障害を引き起こす可能性があると考えている。

2. 研究の目的

これらの研究背景を踏まえ、本申請書では、5 GHz 以上の超高速性と 80 % 以上の量子効率の性能を持つ単一光子検出技術の実現を目指した研究課題を申請する次第である。申請者らのこれまでの研究成果を元に、検出素子の微細化を行うことで超高速化への展開を図るものとする。素子大きさを 100 nm とした線幅まで微細化すると、局所的なエネルギーの損失過程が支配的となり、超伝導体内部では電子温度と格子温度の強い分離が生じる。これは、通常ホットエレクトロン効果と呼ばれているが、この状態の熱緩和過程は電子 - 電子散乱で生じることになる。この緩和時間は低温でも通常 ps 程度であるため、よって、超高速化への展開が可能となる。このようなアプローチにて時間領域で情報を与える単一光子検出技術を確立し、光量子情報通信等に真に貢献できる技術となることを目指す。

3. 研究の方法

ホットエレクトロンによる超伝導体単一光子検出技術は、モスクワ国立教育大学、マサ

チューセツ工科大学、情報通信研究機構など国内外を含めていくつかの機関が先行して研究を行っている。これらの研究は、いずれも窒化ニオブを超伝導体を用いたメアンダ型の検出器構造を用いている。しかしながら、本申請研究課題では、申請者らの独自のアイデアを元にして、これらの先行研究とは全く異なる側面から本研究課題の最終目標への到達を目指すものとする。以下に、本申請課題のアプローチ法を述べる。

動的インダクタンスの小さな材料の検討

独自の光閉じ込め構造による量子効率の向上

低温読み出し増幅回路の構築

現状の窒化ニオブによる検出器では、電子電子散乱の緩和時間(数 ps)に対し、1GHz 程度の動作周波数しか達成されていない。これは、窒化ニオブの長い磁束進入長特性に由来した動的インダクタンスにより応答速度が制限されるためである。すなわち、窒化ニオブを用いる限り、1GHz 以上の動作周波数は望めないということになる。そこで、本申請課題ではまずとして、超伝導体の磁束進入長や臨界温度、臨界電流等の特性が動的インダクタンスや検出器の応答特性に与える影響について BCS 理論を元に理論的に明らかにする。これらの知見を元に 5GHz 以上の高速性を得るために必要な超伝導材料や最適パラメータを導出する。窒化ニオブは、通常 900 程度の高温で製膜されるため、デバイスの作成上様々な面で制約となることが多い。しかし、もし窒化ニオブ以外に最適な材料が候補としてあがれば、この制約が取り払われて検出器作成の自由度が広がることになる。そこでとして、作成自由度の高い超伝導体を用いて独自の光閉じ込め構造を構築し、これにより量子効率の向上を図るものとする。現状のメアンダ型の構造では、受光面積に対してその充填率を上げることは困難である。しかし、作成の自由度があがれば、積層メアンダラインおよび無反射層による光閉じ込めキャビティのような構造を用いることが可能となる。さらにとして、構築した光検出素子に最適な低温増幅回路を構築する。現状の信号読み出し方法では、50 伝送ラインで信号の伝達が行われているが、信号増幅に常温アンプを使用しているため、伝送ライン中での損失が多量であり、信号帯域や感度の点ではきわめて不都合なものとなっている。そこで、近年低温でも優れた信号帯域で動作する SiGe トランジスタなどの技術を用いて、本光検出素子に適した低温アンプを構築するものとする。

以上、 、 の独自のアイデアに基づく観点から研究を遂行する。研究期間三年間でそれぞれの課題を明らかにすることで、

最終的に数値目標 5GHz の動作速度と 80% の量子効率を持つ単一光子検出技術の実現を目指す。

4. 研究成果

従来、超伝導体を用いた単一光子検出器では、窒化ニオブ (NbN) 超伝導薄膜が用いられている。しかし、NbN を用いた SSPD は、 $1 \mu\text{H}$ を超える力学的インダクタンスがあり、このインダクタンスによる制限のため、繰り返し動作周波数は 100 MHz 程度に制限される。また、SSPD は膜厚が数 nm と薄く光の吸収効率が低いため、実現されている検出効率は数%程度に留まっている。そこで、本研究では、力学的インダクタンス、作製の容易さの観点からニオブ (Nb) を用いた SSPD の開発を行った。Nb の力学的インダクタンスは、NbN に比べて、2桁程度小さいため、応答速度の大幅な向上が期待できる。また、Nb は SiO₂ などの誘電体薄膜上に高品質な薄膜が成膜可能であり、光閉じ込め構造の作製も容易であるという利点を有する。

Nb を用いた SSPD の作製方法について説明する。熱酸化膜を形成したシリコン基板上にスピコートにより電子線描画レジスト ZEP520A-7 を塗布した後、電子ビーム描画装置 (クレステック製 CABL9000) を用いて、線幅 50~200 nm のメアンダ構造とコプレーナウェーブガイドライン (CPW) のリフトオフパターンを形成する。その後、スパッタにより Nb を成膜し、剥離液を用いてリフトオフを行い Nb のメアンダ構造と CPW を作製した。図 1 に作製したメアンダ構造の顕微鏡画像を示す。20 μm \times 20 μm の領域にわたり良好なメアンダ構造の作製に成功した。また、Nb の膜厚は、原子力間顕微鏡 (AFM) を用いて測定を行った。

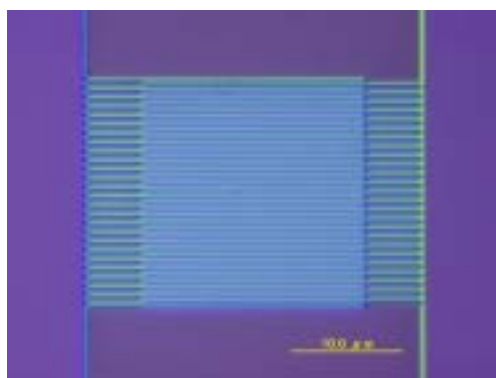


Fig. 1. Micrograph of a meander pattern of 200-nm-wide nanowire covering 20x20 μm^2 area

図 2 はメアンダ構造の AFM 観察像であり、ラインアンドスペースの段差から膜厚は 8 nm であることがわかる。

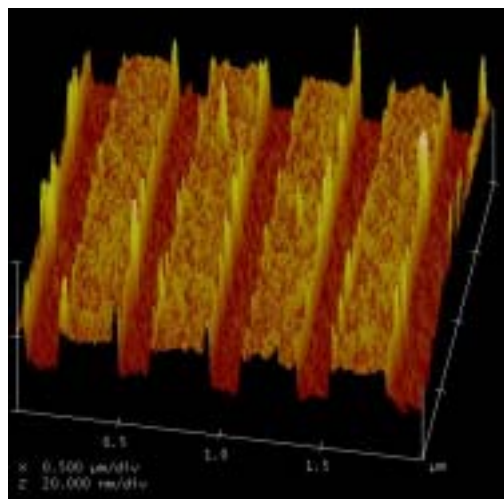


Fig. 2. AFM image of line and space pattern

作成した Nb-SSPD に光ファイバを接続し、光照射実験を行った。ファイバ結合したデバイスを、He デュワー内のコールドステージに設置し、He を減圧することで 1.7 K にまで冷却する。このデバイスの信号は、ステージ上に設置した低温動作可能な低ノイズ電圧アンプで増幅され、同軸ケーブルを経て常温側のオシロスコープ及びカウンターで計測される。図 3 に測定系のセットアップを示す。

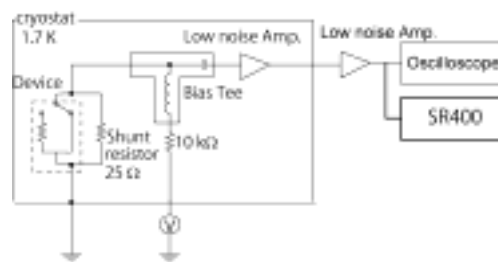


Fig. 3. Experimental setup for signal measurements

このセットアップを用いて、作成したデバイスの光照射に対する応答特性の評価を行った。通信波長帯の光子を照射して得られた信号波形例を図 4 に示す。太線が実験値、細線は二つの時定数を持つ指数関数で最小二乗法によりフィッティングしたときの結果である。最小二乗法により求めたパラメータから、応答時定数は 2.5 ns となった。この結果から、デバイスの力学的インダクタンスを求めると、56 nH を得る。この値は、従来報告されている同形状の Nb-SSPD と比較して半分の値となっている。信号の応答時定数は、この力学的インダクタンスに大きく依存する。Nb-SSPD を用いると、より小さな力学的インダクタンスが可能となり、よってデバイスの高速化に大きく寄与できるものと期待できる。これは、将来の情報通信産業や、より高速な時間特性を要求するアプリケーション

ヨンには極めて望ましい特性であり、今後、さらに単一光子検出の性能を向上させて、微弱光検出に関する分野に本技術を応用にさせて行きたいと考えている。

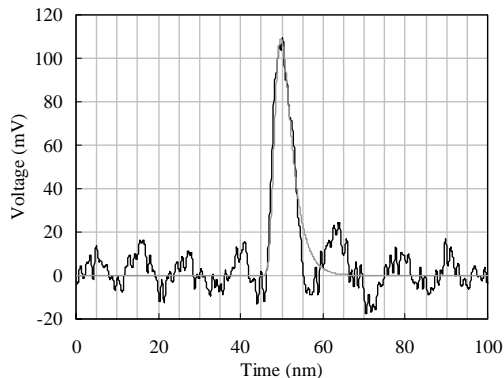


Fig. 4. Example of signal observed by Nb-SSPD.

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. G. Fujii, D. Fukuda, T. Numata, A. Yoshizawa, H. Tsuchida, S. Inoue, T. Zama, Fiber Coupled Single Photon Detector with Niobium Superconducting Nanowire, Proceedings of Quantum Com 09, 2009, 220-224, 査読無し
2. 福田大治、超伝導単一光子検出器、電子情報通信学会誌、査読無し、90巻、2007、674-679

[学会発表](計4件)

1. G. Fujii, D. Fukuda, T. Numata, A. Yoshizawa, Fiber coupled single photon detector with Niobium Superconducting Nanowire, 1st International ICST Conference on Quantum Communication and Quantum Networking, 2009年10月26日、ナポリ、イタリア
2. 藤井剛、福田大治、沼田孝之、吉澤明男、土田英実、井上修一郎、Nb 超伝導ナノワイヤを用いた単一光子検出器、2009年秋季第70回応用物理学学会学術講演会、2009年9月8日、富山大学
3. D. Fukuda, G. Fujii, T. Numata, Single photon detection techniques based on superconducting detector towards quantum optical metrology, The 10th

international conference on New Development and Applications in Optical Radiometry, 2008年10月16日、Daejon, Korea

4. 藤井剛、福田大治、超伝導光子数識別器の量子効率の改善、2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会、2008年3月28日、日本大学理工学、船橋キャンパス

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 超伝導光検出素子

発明者: 福田大治、吉澤明男

権利者: 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2010-122669

出願年月日: 2010年5月28日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 大治 (FUKUDA DAIJI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員

研究者番号: 90312991

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし