

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82636

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20438

研究課題名（和文）超伝導ナノワイヤを積層した高性能な単一光子検出器の開発

研究課題名（英文）Development of high-performance multi-layer superconducting nanowire single-photon detectors

研究代表者

知名 史博（China, Fumihiro）

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所神戸フロンティア研究センター・研究員

研究者番号：90912436

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では自由度の高い波長特性の設計、および高検出効率な超伝導ナノワイヤ単一光子検出器（SSPD）を実現することを目的に、ナノワイヤ2層と複数の誘電体多層膜からなる高性能SSPDの開発を行った。誘電体多層膜を最適化し、可視光帯に広帯域な吸収率特性を持つナノワイヤ積層型SSPDのパラメータ解を得た。また2層のメアンダ形状の超伝導ナノワイヤを同じ向きに配置した場合でも、光吸収率の偏光依存性を低減できることを確認した。またナノワイヤ積層型SSPDを実現するため、イオンビーム照射やバイアススパッタ法による誘電体表面加工プロセスを導入した素子作製プロセスを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導ナノワイヤ2層と複数の誘電体多層膜光共振器からなるナノワイヤ積層型SSPDにより、従来よりも自由度の高い光学設計が可能なSSPDを開発することができる。また本研究で開発したナノワイヤ積層型SSPDは、上下のナノワイヤの向きを揃えた場合でも偏光依存性を低減することができる。本研究により、偏光依存性を積極的に低減した、高効率なSSPDを開発することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed an SSPD composed of two nanowires and multiple dielectric multilayer cavities, which realizes flexible optical design and high detection efficiency. We designed the nanowire stacked SSPD with wideband optical absorptance for the visible wavelength band. We confirmed that the polarization dependence of the nanowire stacked SSPD can be reduced even when the two meandering nanostraps are arranged in the same direction. In addition, in order to realize a nanowire stacked SSPD, we have developed a device fabrication process with dielectric surface planarization process using ion beam irradiation and bias sputtering.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：超伝導ナノストリップ単一光子検出器 SNSPD SSPD 誘電体多層膜

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

単一光子検出器は光の粒 (光子) まで検出を可能にする技術であり、光通信、生体・医療計測、物質探査、宇宙観測など、世の中のあらゆる現象を認識・探索する上で欠かせない技術である。その中でも超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD) は紫外光から中赤外光に至るまでの広い波長領域に感度を有しており、高検出効率、高速動作性など優れた特徴をもつ。SSPD は厚み 10 nm 以下のごく薄い超伝導体から作製されたメアンダ形状のナノワイヤと、誘電体の光共振器で構成されている。超伝導ナノワイヤには直流電流が印加されており、超伝導ナノワイヤに吸収された光子のエネルギーにより超伝導状態が破壊されることで抵抗成分が発生し、光子検出に至る。超伝導ナノワイヤは広い波長領域で光を吸収でき、そのため広帯域に感度を有するが、単体では 10% 程度の光吸収率しか持たない。そこで誘電体薄膜を用いた光共振器をナノワイヤ上下に配置し、光吸収率を高める手法が用いられている。光共振器を構成する誘電体材料や膜厚、膜数を最適化することで、任意波長の光吸収率を高めることが可能となる。このように SSPD の光学特性は主に誘電体光共振器によって決まり、様々な学術分野への展開のためには高感度でかつ広帯域な特性を得る誘電体光共振器の設計が重要となる。しかし誘電体光共振器で特定波長の光吸収率を高めることと、光吸収率の高い波長領域を広げてよりブロードバンドな光学特性を得ることはトレードオフの関係にあり、両立は難しい。また超伝導ナノワイヤは光の向き (電場の振動方向) に光吸収率が左右される偏光依存性を持ち、これを低減する目的でも誘電体光共振器は使用される。しかし高光吸収率・ブロードバンド・偏光依存性の低減という要求を、従来の SSPD 構造で達成することは困難であった。

2. 研究の目的

本研究では超伝導ナノワイヤを 2 層積層することで、単一の超伝導ナノワイヤでは達成が難しい光学特性を備えた高性能 SSPD を実現することを目的とし、各ナノワイヤの上下に合計 3 つの誘電体光共振器を導入可能なナノワイヤ積層型 SSPD (図 1) の開発に取り組んだ。従来の SSPD と比べて超伝導ナノワイヤと誘電体光共振器が増えることで、従来よりも自由度の高い SSPD の光学設計が可能となる。また従来の SSPD では超伝導ナノワイヤのメアンダ形状に由来して、入射光子の偏光状態に光吸収率が左右される偏光依存性が生じる問題があった。本研究ではナノワイヤを積層することによる偏光依存性の低減可能性についても検討した。

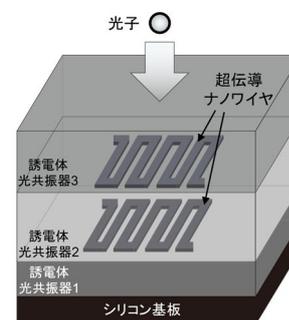


図 1. ナノワイヤ積層型 SSPD の概略図

3. 研究の方法

光学薄膜ソフトウェアによる誘電体多層膜構造の最適化および、有限要素解析法による超伝導ナノストリップの光吸収率計算を組み合わせた手法で、ナノワイヤ積層型 SSPD の光学設計を検討した。またナノワイヤ積層型 SSPD の実現に向け、作製プロセスの開発を行った。SSPD に用いる超伝導ナノワイヤは厚み 10 nm かつ幅 100 nm 程度の薄く細い構造のため、下地の状態に超伝導ナノワイヤの均一性が大きく左右される。そこで、上部ナノワイヤの作製前に誘電体光共振器 2 の表面を加工する手順を入れ込んだ素子作製プロセスを開発した。

4. 研究成果

(1) ナノワイヤ積層型 SSPD の光学設計の検討

本研究では、光学薄膜ソフトウェアの Essential Macleod による誘電体多層膜構造の最適化と、モデリングソフトウェア COMSOL による有限要素解析を併用したナノワイヤ積層型 SSPD の設計の検討を行った。まず、ナノワイヤにパターン化されていない窒化ニオブチタン (NbTiN) 薄膜 2 層の光吸収率が、可視光帯の波長 650 nm 帯で最大となるように、誘電体光共振器の最適化を行った。その後、COMSOL で線幅 150 nm、ギャップ幅 100 nm のナノワイヤ形状をモデリングし、NbTiN ナノワイヤの光吸収率を有限要素解析により導出した。設計したナノワイヤ積層型 SSPD の断面構造を図 2 に示す。図 2 では、上部ナノワイヤと下部ナノワイヤが縦方向に完全に重なるように配置された構造を示している。図 2 のナノワイヤ積層型 SSPD の光吸収率特性を図 3 (a) に示す。図 3 (a) の破線グラフはナノワイヤにパターン化されていない 2 層の NbTiN 薄膜の合計吸収率を示し、2 本の実線グラフはそれぞれ、TE 光と TM 光に対する上下ナノワイヤの合計吸収率を示す。光共振器の誘電体には、可視光帯で吸収損失が生じない二酸化ケイ素 (SiO₂) と二酸化チタン (TiO₂)

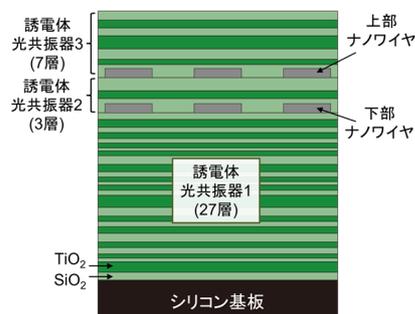


図 2. 設計したナノワイヤ積層型 SSPD の断面構造

の 2 種類を選択した。図 3 (a) から、NbTiN 薄膜 2 層では波長 580 nm 以上で広帯域に高い光吸収率を有していることがわかる。一方で NbTiN ナノワイヤ 2 層では、薄膜の場合と比べて光吸収率が減少するものの、高吸収率と広帯域性が維持されていることを確認した。また従来のナノワイヤ単層の SSPD と異なり、ナノワイヤ積層型 SSPD では有限要素解析を行った全波長領域で偏光依存性が殆ど生じないことがわかった。図 3 (b) に上部・下部ナノワイヤそれぞれの光吸収率の偏光依存性を示す。図 3 (b) より、上部ナノワイヤと下部ナノワイヤそれぞれの偏光依存性が抑制されていることから、ナノワイヤ積層型 SSPD は偏光依存性を効果的に低減可能な構造であることが示された。一方で図 3 (b) から、上部ナノワイヤと下部ナノワイヤで光吸収率特性が大きく異なることが確認された。ナノワイヤ積層型 SSPD でより広帯域かつ高吸収率な光学特性を得るためには、個々のナノワイヤの光学特性を考慮しつつ構造の最適化を行う必要があるが、現在の光学設計手法ではナノワイヤ形状をパターン化した状態での誘電体光共振器の最適化はできない。ナノワイヤ積層型 SSPD でより優れた光学特性を得るための、個々のナノワイヤの光吸収率特性をモニターしつつ誘電体光共振器の最適化を行う手法の開発が今後の課題である。

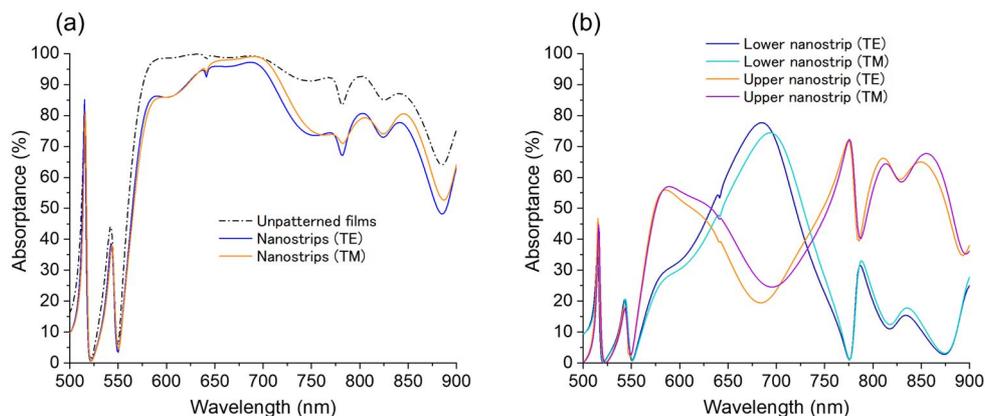


図 3. (a) 設計したナノワイヤ積層型 SSPD の光吸収率と (b) 上部および下部ナノワイヤの光吸収率の偏光依存性

ナノワイヤ積層型 SSPD において、光吸収率の上下ナノワイヤ位置依存性を評価した。図 4 (a)(b) に波長 650 nm 光入射時の上下ナノワイヤ周辺の電場分布を、図 4 (c) に光吸収率の上下ナノワイヤ位置依存性を示す。図 4 (a) は図 2 と同様に上下ナノワイヤが縦方向に完全に重なるように配置された場合の電場分布であり、図 4 (b) は上部・下部ナノワイヤが交互に並ぶように配置された場合の電場分布である。図 4 (a)(b) から入射した光の電場強度分布は上下ナノワイヤの位置に依存せず、図 4 (c) より光吸収率も上下ナノワイヤの位置に依存しないことが確認された。以上の結果からナノワイヤ積層型 SSPD の作製時において、上下ナノワイヤの nm オーダーのアライメントずれによる光学特性のシフトを考慮する必要がないことを確認した。

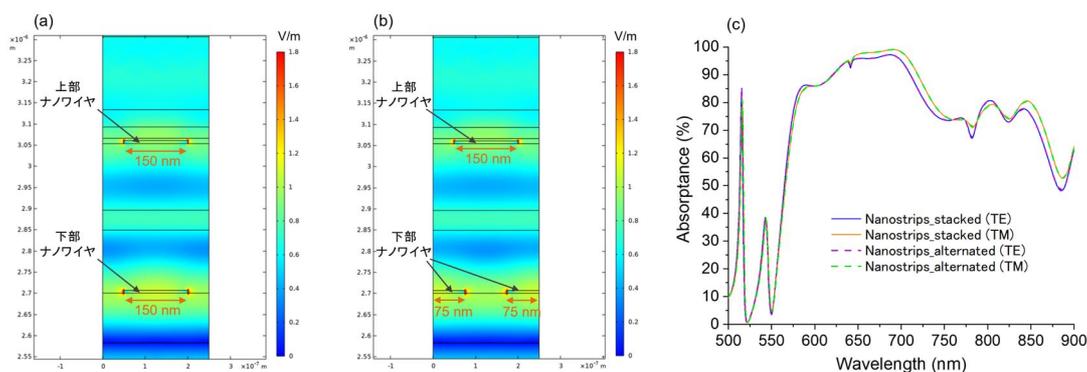


図 4. 波長 650 nm 光入射時の (a) 上下ナノワイヤを縦方向に重ねた場合および (b) 交互に並べた場合の電場分布、(c) 光吸収率の上下ナノワイヤ位置依存性

(2) ナノワイヤ積層型 SSPD の作製プロセスの開発と素子の評価

ナノワイヤ積層型 SSPD の作製プロセスを開発した。まず、設計した通りに作製された 27 層の $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 誘電体多層膜つきシリコン基板上に下部ナノワイヤを作製した。その後 RF スパッタリング法により SiO_2 層を成膜した (誘電体光共振器 2 に相当)。ここで、下部ナノワイヤの凹凸形状が誘電体光共振器 2 の表面に転写されることが考えられたため、バイアススパッタ方式で SiO_2 層を追加成膜し、誘電体光共振器 2 の表面の平坦化を試みた。その後更にアルゴンイオンビームを照射することで誘電体光共振器 2 の表面をクリーニングし、上部ナノワイヤを作製した。上下ナノワイヤはそれぞれ、主に電子線描画リソグラフィプロセスとリアクティブイオンエ

ッティングにより作製された。図 5 に作製したナノワイヤ積層型 SSPD のデバイス写真を示す。各ナノワイヤの膜剥がれや欠陥は確認されていない。以上から、ナノワイヤ積層型 SSPD の作製プロセスを確立することに成功した。

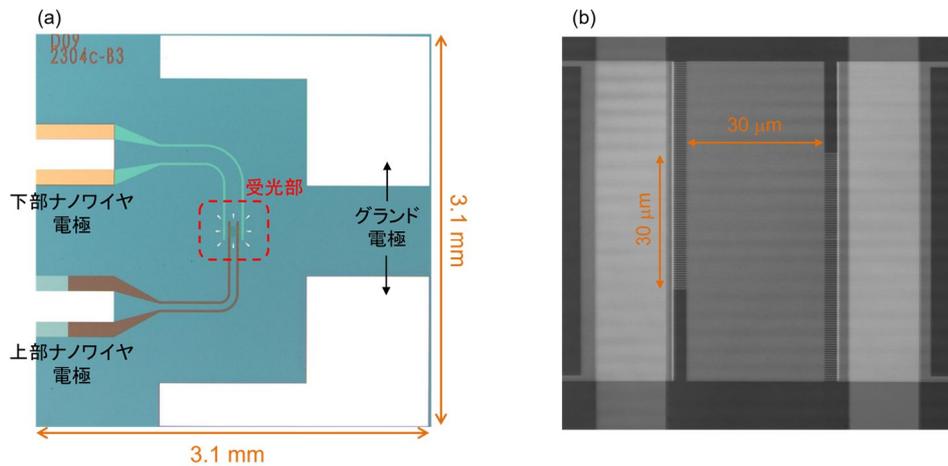


図 5. 作製したナノワイヤ積層型 SSPD の (a) チップ写真、および (b) ナノワイヤ受光部のレーザ顕微鏡写真

作製したナノワイヤ積層型 SSPD をギフォード・マクマホン型冷凍機に導入し、素子特性の評価を行った。図 6 に測定温度 2.15 K における上部・下部ナノワイヤの IV 特性を示す。測定結果から各ナノワイヤの臨界電流値が一致しており、2 層の超伝導ナノワイヤが均質に作製されていることを確認した。図 7 に波長 660 nm の光子入射時における各ナノワイヤの光子カウントレートと暗計数率のバイアス電流依存性を示す。光子応答試験では、上部・下部ナノワイヤともに単一光子検出に成功した。以上の結果から、均質な 2 層の超伝導ナノワイヤからなるナノワイヤ積層型 SSPD の開発に成功した。今後は更に優れた光学特性を有するナノワイヤ積層型 SSPD 実現に向け、効率的な設計手法の検討を進める計画である。

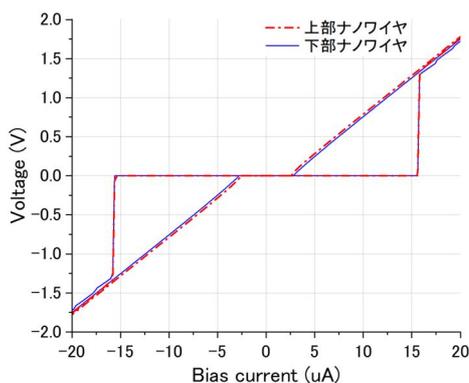


図 6. 作製したナノワイヤ積層型 SSPD の上部ナノワイヤと下部ナノワイヤの IV 特性

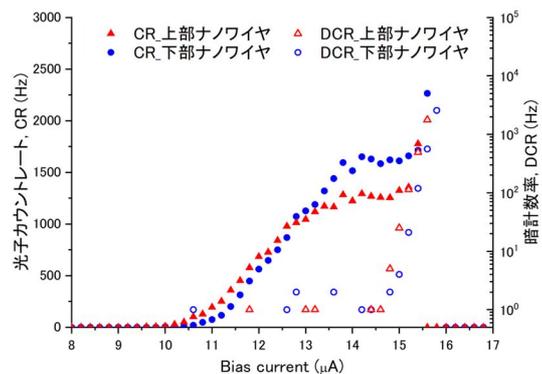


図 7. ナノワイヤ積層型 SSPD の各ナノワイヤの光子カウントレートと暗計数率のバイアス電流依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 China Fumihiro, Yabuno Masahiro, Mima Satoru, Miyajima Shigeyuki, Terai Hirotaka, Miki Shigehito	4. 巻 31
2. 論文標題 Highly efficient NbTiN nanostrip single-photon detectors using dielectric multilayer cavities for a 2- μm wavelength band	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 20471 ~ 20479
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.492957	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------