

博士論文（要約）

Ir 超伝導体を用いた赤外単一光子検出器の研究

三浦 義隆

1. 序論

1.1 研究の背景

量子コンピュータは、量子状態の重ね合わせを利用することで古典コンピュータよりも効率的に計算を行うことが可能である。光の量子状態を利用し、古典コンピュータと同様の理論ゲートを適用した光量子コンピュータでは、高い測定効率が必要となる。最近、光量子コンピュータの新しい方式として、光ファイバを用いたループ構造内に量子ゲートを作成し、パルスがループ内を伝播する際に量子演算を実行するループ型演算回路が提案され、注目を集めている。本方式に対応するためには、通信波長帯の赤外光子に対して高い量子効率を有する光子数識別器が必要となる^{1,2)}。

現在、赤外光検出器として、アバランシェフォトダイオード (APD: Avalanche Photodiode) が用いられるが、最近では超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (Superconducting Nanowire Single Photon Detector; SSPD)、および超伝導転移端センサ (Transition edge sensor; TES) が開発され、利用されようとしている。量子コンピュータでは低ノイズで光子数識別能を有し、量子効率が高い赤外光検出器が要求される。APD や SSPD は原理上光子数識別能を持たないが、TES は超伝導と常伝導の間の急峻な温度転移領域における光子入射による温度上昇を検出原理とするマイクロカロリメータの一種であるため、TES を用いることで光の量子状態を利用した量子コンピュータの実現に向けて注目されている。

赤外光検出器として現在研究が行われている TES の超伝導金属薄膜としては、単相のチタン (Titanium; Ti) と タングステン (Tungsten; W) または、常伝導金属の金 (Gold; Au) を利用し、近接効果による転移温度の低下を狙った二層の Ti/Au が報告されている³⁻⁵⁾。Ti/Au-TES の場合、TES のエッジの粗さが単層よりも顕著となり、熱容量は増加し、Au は Ti よりも高い反射率のため、より高い量子効率とエネルギー分解能を有する Ti/Au-TES を作製することは困難である^{6,7)}。また Ti は転移温度が 390 mK と高く、W は結晶構造の違いから安定的に転移温度のそろった薄膜を作製することが難しい⁸⁾。そこで、転移温度がバルクで 140 mK と低く、安定的に作製でき、原理的に高い量子効率を実現することが可能なイリジウム (Iridium; Ir) を超伝導金属薄膜として選択することで、赤外光検出器として高い性能を有する検出器を実現することを考えた。

1.2 本研究の目的

本研究では赤外光検出器として原理的に、要求される条件を満たす可能性のある技術として TES に着目し、転移温度がバルクで低く、安定的に作製可能な Ir を超伝導金属薄膜として使用した高検出効率かつ光子数識別能を有する赤外単一光子検出器を開発し、その性能を実証することを目的とした。

2. Ir 超伝導体赤外単一光子検出器の開発

我々はこれまでに Ir 超伝導体を用いた TES を開発し、X、 γ 線計測などの応用に用いてきた。それらの計測では、対象となる光子のエネルギーは、1 keV から 500 keV 程度であった。一方、通信波長帯である $1.5 \mu\text{m}$ の赤外光のエネルギーは 0.8 eV 程度のため、X 線を対象とした TES と比較して $1/1000$ 以下のエネルギーしか入射しない。先述のように、TES は吸収体の温度上昇を検出原理とするため、有感面積 $200 \mu\text{m}^2$ 角程度の X 線用 TES では、光子入射時の温度上昇、信号の大きさが $1/1000$ 以下となり、雑音に埋もれて測定できない。温度上昇は素子の熱容量と反比例するため、有感面積を $1/1000$ 以下として、素子の熱容量を 1000 倍程度小さくすることを考えた。

そこで、上記の検討をもとに TES のサイズは、 $7 \times 7 \mu\text{m}^2$ から $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ までのパターンとした。実際に作製した $7 \mu\text{m}$ の Ir-TES の写真を図 1 に示す。Ir-TES は SiN/Si/SiN チップ上にポジ型フォトレジストを均一に塗布し、露光装置 (MA6 Mask Aligner, SUSS MicroTec SE) を使用して TES のパターンニングを行い、その後、Ir を高周波マグネトロンスパッタリングで SiN/Si/SiN チップ上に 20 nm 積層してリフトオフ法により形成した。Ir と同様にニオブ (Niobium; Nb) 電極パターンをパターンニングし、高周波マグネトロンスパッタリングで Nb を 250 nm 積層して赤外単一光子検出器としての Ir-TES を作製した。

3. 測定システムの構築

図 2 に、測定システムについて示す。Ir-TES の超伝導薄膜にシャント抵抗と定電流源を利用して疑似的な定電圧バイアスを印加させた。また、TES の直上にシングルモードの光ファイバが配置できるように固定用の治具を作成し、赤外顕微鏡を用いて調整した。この時、TES と光ファイバの距離はおよそ 2 mm 程度であり、スポット径はおよそ $20 \mu\text{m}$ あった。このモジュールを $^3\text{He}/^4\text{He}$ の希釈冷凍機に導入し、 60 mK 程度まで冷却した。赤外光は室温からシングルモードの光ファイバを通して極低温まで導入することが可能である。TES の信号は超伝導量子干渉計 (Superconducting Quantum Interference Device; SQUID) および室温の増幅回路を通して増幅し、A/D 変換器を使用してデジタルデータとして取得した。

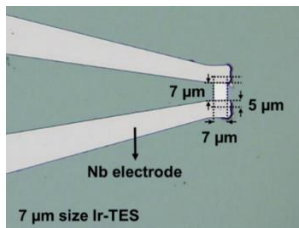


図 1 $7 \mu\text{m}$ Ir-TES の I-V グラフ

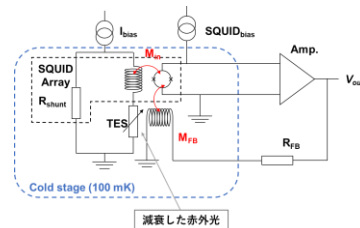


図 2 読み出しシステム

4. Ir-TES の動作実証

図 3 に熱浴温度が 64 mK における $7 \mu\text{m}$ Ir-TES の電流電圧 (I-V) 測定および電力電圧 (P-V) 測定の結果を示した。 $P_{\text{ETF}} = 3.0 \text{ pW}$ と一定になる領域が確認されたため、作製した Ir-TES

は電熱フィードバック (electro-thermal feedback; ETF) で動作していることが確認された。

また、図 4 に 64 - 290 mK までの温度で I-V 測定した結果を示す。作製した 7 μm Ir-TES の転移温度がおおよそ 280 mK となり、バルクの Ir の転移温度が 140 mK よりも高くなったことが確認された。近接効果の影響で転移温度近傍では P-T グラフがフィッティング曲線からずれることが報告されているが、その影響は見られない。そのため、スパッタ条件による影響によってバルクの Ir よりも転移温度が上昇したと考えらる。

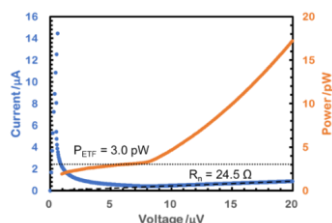


図 3 7 μm Ir-TES の I-V グラフ

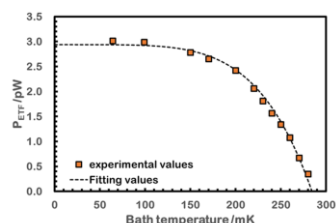


図 4 7 μm Ir-TES の P-T グラフ

5. 光測定

図 5 に 10 μm Ir-TES に波長 860 nm のパルスレーザー照射によって観察された信号を示した。この測定結果から、立ち上がりの時定数がおおよそ 0.6 μs 、減衰時定数がおおよそ 6 μs であることがわかり、測定帯域を広げることで立ち上がりの時定数が 0.1 μs 程度まで向上することを確認した。

また、図 6 に示したように、光子数が 0、1、2 と光子数識別ができたことを確認した。加えて、光の照射パワーを変化させることで光子数がおおよそ 30 個程度まで識別が可能であることがわかり、この結果から、世界で初めて Ir-TES を用いておおよそ 30 個程度まで通信波長帯の赤外光子を弁別できた。この時のシステム全体での量子効率¹は 10^{-7} 程度であった。しかし、冷凍機内部の接続でのコアの汚染によって 2 桁程度効率が低下しており、加えて、冷凍機導入時に光ファイバが一部欠損していたことから、量子効率は 10^{-5} 以上であることが見込まれる。

6. Ir-TES の光学特性および共振構造シミュレーション

作製した Ir-TES の光学特性を調べるため、SiN/Si/SiN の欠片チップ上に Ir 薄膜を 20 nm スパッタし、全光線透過・反射測定システム (Asahi Spectra Co., Ltd.) を用いて透過率および反射率を測定した。この結果、波長 400 - 1100 nm の赤外光に対して作製した Ir 薄膜は反射率がおおよそ 50 - 65%、透過率が < 4% と分かった。

また、量子暗号通信や量子コンピュータへの応用では通信波長帯の光子に対して 100% 近い量子効率を有する必要がある。前述したように、20 nm 積層した Ir 金属薄膜の反射率が 50% であるため、入射光すべてが Ir-TES に吸収されない。そこで、薄膜の光学特性シミュレーション計算コード TFCalc を用いて、キャビティ構造の最適化シミュレーションを行った。この結果、SiN/Si/SiN チップ上に Ir を 40 nm 積層し、その上に反射防止膜 (anti reflection ;AR) の構造

(SiO₂; 50 nm/TiO₂; 100 nm/ SiO₂; 270 nm/TiO₂; 169 nm/ SiO₂; 169 nm/TiO₂; 169 nm) を作製すると、光ファイバの損失が少ない 1550 nm の赤外光がほとんど反射しないキャビティ構造を持つ Ir-TES を作製できることが確認された。この構造を取り入れ、光のスポット径を小さくすることによってシステム全体の検出効率が改善されることが期待される。

7. 結論

本研究では、量子コンピュータの実現に向けた赤外単一光子検出器として Ir-TES の開発を行った。10 μm Ir-TES では、立ち上がりの時定数がおおよそ 0.6 μs 、減衰時定数がおおよそ 6 μs であることがわかり、測定帯域を広げることで立ち上がりの時定数が 0.1 μs 程度まで向上することを確認した。

また、図 6 に示したように、光子数が 0、1、2 と光子数識別ができたことを確認し、光子数がおおよそ 30 個程度まで識別が可能であることがわかり、世界で初めて Ir-TES で赤外単一光子を計測することができた。このことから、作製した Ir-TES が赤外単一光子検出器として高い性能を持つことが分かった。今後は、量子効率を高める光キャビティ構造を有する Ir-TES 赤外単一光子センサの開発によって、光の量子状態を利用した量子コンピュータの実現に寄与すると期待される。

参考文献

- 1) M. A. Nielsen and I. L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge University Press, Cambridge (2004).
- 2) M. Yukawa et al., Opt. Express 21, 5529 (2013).
- 3) Lolli et al., Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 041107.
- 4) D. Fukuda et al., Optics Express 19, 870 (2011)
- 5) A. E. Lita et al., Optics Express 16, 3032 (2008)
- 6) Y. Kunieda et al., Jpn. J. Appl. Phys 43 (2004) 2742.
- 7) R. Mudiyansele et al., Jpn. J. Appl. Phys 45 (2006) 6259.
- 8) A. E. Lita et al., IEEE Trans. Appl. Supercon. 15, 3528 (2005)