

平成24年度 委託研究
「光・量子情報通信用超伝導単一光子検出システムの
小型化技術の研究開発」
研究計画書

1. 研究開発課題

『光・量子情報通信用超伝導単一光子検出システムの小型化技術の研究開発』

2. 研究開発の目的

光のエネルギー量子である光子一個の到来を高感度で高速に検出する技術（単一光子検出技術）は、盗聴を完全に見破ることのできる量子暗号の実現に必須のものである。この10年来、我が国や欧米、ロシアなどで超伝導ナノ細線を用いた単一光子検出技術が飛躍的に向上し、従来の半導体雪崩増倍型（APD）光子検出器では実現できなかった低雑音、高感度での光子検出が可能になってきた。我が国では、情報通信研究機構（以下、「機構」という。）が独自の超伝導ナノ細線作製技術と光ファイバ実装技術を開発し、市販の冷凍機に複数チャンネルを実装したマルチチャンネル超伝導単一光子検出システムを開発している[1,2]。このシステムは、すでに量子暗号ネットワークでも利用され、伝送距離の伸延や鍵生成速度の向上に威力を発揮している[3-5]。今後は、その優れた低雑音特性と高い時間分解能特性から、光空間通信や光計測分野でも利活用が期待される。

一方、超伝導単一光子検出システムは、高性能であるにも関わらず、半導体方式に比べてサイズが大きく消費電力も大きいため、それが製品化、普及、及び利用用途拡大の制限要因になっている。現状のシステムは、冷凍機部分まで含めて19インチラックを若干超えるサイズがあり、可搬とは言い難い。

そこで、本研究開発課題では、システムの主要体積を占める極低温冷凍機（現行のシステムで使用されている冷凍機は Gifford-MacMahon（GM）冷凍機（ヘリウムガス循環型の冷凍機））を小型化しつつ、光・量子情報通信における高い光子検出性能を達成できる温度領域（2K 台）を維持できる、超伝導単一光子検出システム用の小型化冷凍システムの研究開発を行い、実際に量子鍵配送試験において性能検証を行う。

3. 採択件数、研究開発期間及び予算

採択件数：1 件

研究開発期間：契約締結日から平成 28 年度までの 5 年間。

予算：平成 24 年度は総額 75 百万円を上限とする。提案の予算額の調整を行った上で採択する提案を決定する場合がある。なお、平成 25 年度以降は対前年度比で 6% 削減した金額を上限として提案を行うこと。

4. 研究開発の到達目標

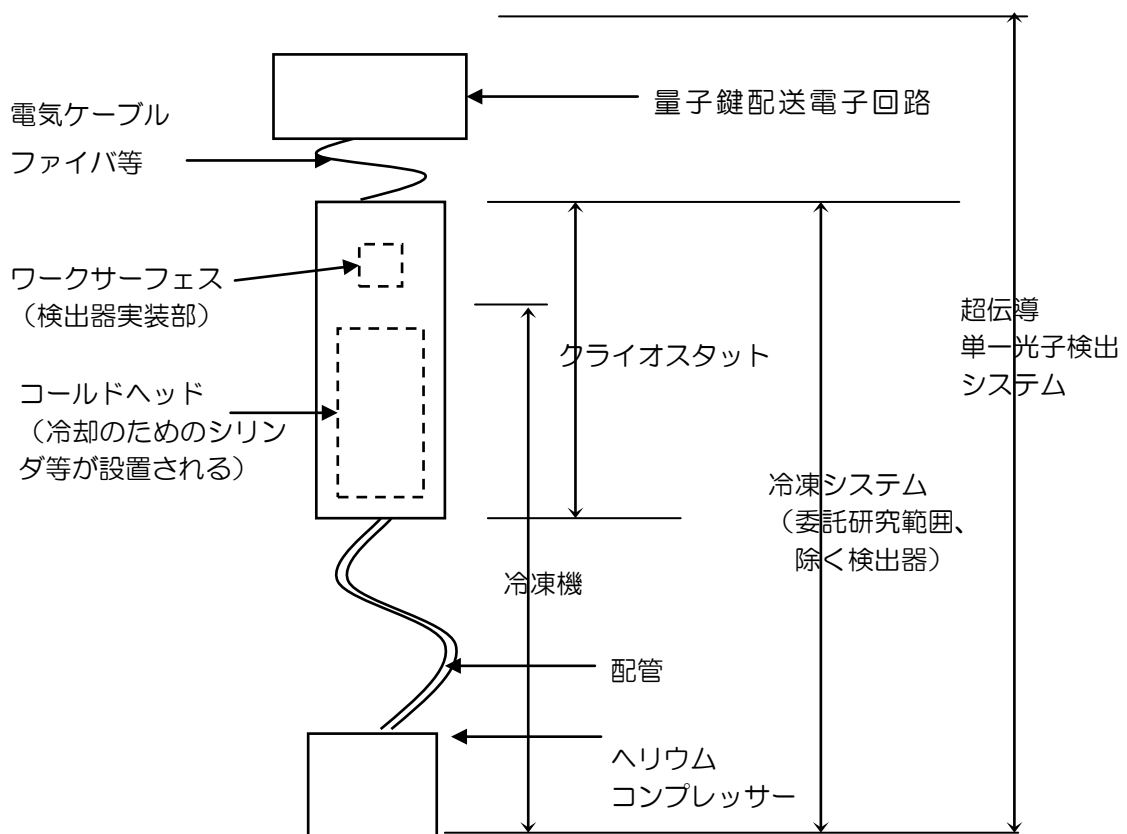
種々の蓄冷材の物性評価など新しい設計手法の確立に必要な基礎データを取得し、複数種類の試作機による性能評価を行って、新たな極低温冷凍機の設計手法を確立するとともに、小型極低温冷凍機のプロトタイプを作製して、信頼性試験を行う。さらに、実際に量子鍵配送試験において性能検証を行う。

現行の超伝導単一光子検出システム [2,4] に用いた冷凍機の冷却効率や温度安定度などを保ちつつ、温度 2K 台、温度安定度 10mK で動作する、より小型の冷凍システム（クライオスタット（コールドヘッドを内蔵）、ヘリウムコンプレッサー及び接続配管）

を研究開発し、現行システム比で容積が 1/3~1/2 程度の可搬型冷凍システムを実現する。クライオスタットには機構が開発する検出器パッケージ [2,4] を6個（1 個当たり消費電力約 10nW）実装可能とする、直流バイアス導入系、出力信号読み出し系、及びファイバ導入系を有すること。

提案にあたっては、目標とする、冷凍システム（クライオスタット、ヘリウムコンプレッサー等）のサイズ、到達温度、温度安定度、冷凍機出力、消費電力の値を具体的に数値で示すこと。また、温度 2K 台をターゲットにした新たな冷凍システム設計手法の確立に向けた課題の抽出や基礎データの取得計画を具体的に記述すること。その上で、最適条件を見出すための冷凍システム試作機の概要と実際の量子鍵配送試験に用いる超伝導単一光子検出システム用冷凍システムプロトタイプの概要を記述すること。

[参考：用語解説]



5. 研究開発の運営管理及び評価について

研究開発にあたっては、機構の研究グループ、特に、未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室超伝導プロジェクト及び量子 ICT 研究室と密接な情報交換を行いながら、試作機の評価と量子鍵配送試験への適用を進めること。また、平成 26 年度に中間評価、平成 28 年度に終了評価を行う。

6. 参考

研究課題の背景及びその必要性

微弱な光パルスを正確に検出する技術は、様々な光計測や先端的な光通信においてなくてはならないものである。特に、光のエネルギー量子である光子一個の到来を高感度で高速に検出する技術、いわゆる単一光子検出技術は、盗聴を完全に見破ることができる量子暗号の実現に必須のものである。

現在市販されている単一光子検出器は、半導体 APD を用いているが、応答時間に限界があり、暗計数雑音もまだ十分低く抑えられておらず、受光感度を持つ波長帯も限られているため、上記用途の性能向上の制約要因となっていた。例えば、量子暗号の伝送距離を 50km 程度の都市圏スケールから 100km 超の都市間スケールまで伸ばそうとすると、従来の半導体 APD では実現が不可能で、極めて低雑音の光子検出技術が必要となる。一方、この 10 年来、超伝導ナノ細線を用いた超伝導単一光子検出技術が飛躍的に向上し、低雑音、高感度、高速動作をバランスよく実現できる技術として期待されている。超伝導ナノ細線素子の受光感度は極めて広く、可視域から遠赤外域まで、半導体 APD では複数の異なる素子でカバーしなければならない波長域を一種類の材料でカバーできる。近年では、先行していたロシア、アメリカの大学の他、超伝導技術を開発している世界の様々な研究機関で研究開発が行われるようになり、国際的な研究開発競争が激化している。

我が国では、機構が独自の超伝導薄膜作製技術やナノ細線加工技術と光ファイバ実装技術を開発し、市販の GM 冷凍機に複数チャンネルを実装したマルチチャンネル超伝導単一光子検出システムを開発し、世界トップクラスの性能を達成している [1,2]。さらに、都市圏の商用ファイバを用いた量子暗号ネットワーク（東京 QKD ネットワーク）の試験運用にも同システムを導入し、動画の秘匿伝送に世界で初めて成功するなど、その有効性と高い信頼性動作を実証してきた [3]。ただ、超伝導単一光子検出システムは、半導体方式に比べサイズが大きく、冷却に要する電力消費も大きい。そのため、高い性能にも関わらず、製品化、普及、及び利用用途拡大が制限されている。

サイズと消費電力を低減して、可搬型極低温冷凍システムを用いた超伝導単一光子検出システムを開発することができれば、量子暗号やレーザ測距での実利用と性能改善を実現できるほか、移動体にも搭載できるようになるため、アドホックの光空間通信に適用して、災害時などに柔軟に大容量の光回線を構築することも可能になる。高性能で小型の光子検出器は、将来の情報通信技術の研究開発の鍵を握ると言っても過言ではない。

研究課題の概要

超伝導単一光子検出システムを小型化・低消費電力化するには、まず、現在の冷凍能力を保持したまま、冷凍システムを小型化する必要がある。現在、超伝導単一光子検出システムに用いられている典型的な冷凍システムは、直径 200mm、高さ 600mm のクライオスタットと約 400mm×400mm×400mm サイズのヘリウムコンプレ

ッサーとからなり、1.5 kW の電力を消費し 0.1 W の侵入熱を外部へ排出して、超伝導ナノ細線受光素子を 4K まで冷却するのが標準的なカタログ仕様となっている。実際には、機構の実験室内にて、このような冷凍システムを使って、素子実装や熱輻射遮蔽等を工夫することで 2K 台前半の温度領域まで冷却することに成功している。実際、超伝導ナノ細線の検出性能は、2K 台前半の温度領域まで入ると格段に向上する。

しかし、クライオスタットの小型化は、クライオスタット内の必要な温度勾配の確保や外部からの熱侵入の抑制を著しく困難にするため、その設計は容易ではない。実際、4K 以下の温度領域ではヘリウムと蓄冷材の物性が急激に変わるため、より低温まで冷却するためには、新たな蓄冷材の選定とこれまでの設計手法の大幅な見直しが必要となる。ヘリウムコンプレッサーの小型化も、全ての機器構成をコンパクトにする必要があり、部品全てを新規開発し、小型の実装法を設計し直す必要がある。

このような新しい設計手法の確立に必要な基礎データも十分にはそろっていないため、まずは、蓄冷材の物性評価と複数種類の試作機による能力の比較評価を着実に進め、その結果に基づいて精度の高い設計手法を見定めてゆく必要がある。その上で、プロトタイプを設計し、信頼性試験と量子暗号（量子鍵配送）のフィールド伝送試験などへの適用を進める必要がある。

目標が達成された暁には、日本の冷凍機技術を飛躍的に向上させることができ、冷凍機の国際市場で日本が主導的立場を確保することができるとともに、世界の超伝導技術の研究開発を底上げすることができるかと期待される。

なお、現在利用されている半導体 Si 系単一光子検出器や化合物半導体 InGaAs 系単一光子検出器は、その検出性能から都市間の量子鍵伝送には適さないが、一方そのコンパクトさから、都市内量子鍵配送システムに適するため、本検出システムとは補完関係にある。

参考文献

- [1] (独) 情報通信研究機構 平成 22 年 7 月 27 日付報道発表「世界最高性能マルチチャンネル超伝導単一光子検出システムを開発」
<http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h22/100727/100727.html>
- [2] S. Miki, T. Yamashita, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Multichannel SNSPD system with high detection efficiency at telecommunication wavelength", Optics Letters, Vol. 35, No.13, pp.2133-2135, 2010.
- [3] (独) 情報通信研究機構 平成 22 年 10 月 14 日付報道発表「量子暗号ネットワークの試験運用開始」
<http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h22/101014/101014.html>
- [4] Z. Wang, S. Miki, and M. Fujiwara, "Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information and communications",

IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, Vol. 15, No. 6, pp.1741-1747, 2009.

- [5] M. Sasaki, M. Fujiwara, H. Ishizuka, W. Klaus, K. Wakui, M. Takeoka, S. Miki, T. Yamashita, Z. Wang, A. Tanaka, K. Yoshino, Y. Nambu, S. Takahashi, A. Tajima, A. Tomita, T. Domeki, T. Hasegawa, Y. Sakai, H. Kobayashi, T. Asai, K. Shimizu, T. Tokura, T. Tsurumaru, M. Matsui, T. Honjo, K. Tamaki, H. Takesue, Y. Tokura, J. F. Dynes, A. R. Dixon, A. W. Sharpe, Z. L. Yuan, A. J. Shields, S. Uchikoga, M. Legré, S. Robyr, P. Trinkler, L. Monat, J.-B. Page, G. Ribordy, A. Poppe, A. Allacher, O. Maurhart, T. Länger, M. Peev, and A. Zeilinger, “Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network,” *Opt. Express*.19, pp. 10387--10409 (2011).