

2 μ m 帯超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の性能評価

青木 誠¹, 岩井 宏徳¹, 川村 誠治¹, 知名 史博², 三木 茂人¹,
寺井 弘高¹, 板部 敏和¹

¹情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1)

²産業技術総合研究所 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1)

Evaluation of a superconducting nanostrip single-photon detector for 2- μ m H₂O DIAL application

Maoko AOKI¹, Hironori IWAI¹, Seiji KAWAMURA¹, Fumihiro CHINA², Shigehito MIKI¹,
Hirotaka TERA¹, and Toshikazu ITABE¹

¹ National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukui Kita, Koganei, Tokyo 184-8795

² National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8560

Abstract: We present a 2- μ m differential absorption lidar (DIAL) system for measuring water vapor, employing a superconducting nanostrip single-photon detector (SNSPD). The SNSPD is particularly suited for DIAL applications due to its superior characteristics, including high detection efficiency, low dark count rate, high photon count rate, and low timing jitter. In this study, we report on evaluation results of system detection efficiency and dark count rate of a SNSPD developed at NICT.

Key Words: Superconducting nanostrip single-photon detector, SNSPD, DIAL, 2 μ m

1. はじめに

単一光子検出技術は、光センシング分野では広く用いられているが、使用される検出器（光電子増倍管やアバランシェフォトダイオードなど）の感度の制約から、紫外から 1 μ m 帯程度までが主であった。近年、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器（SNSPD: Superconducting nanostrip single-photon detector）の量子情報通信分野への普及に伴い、特に光通信帯（1.5 μ m 帯）での単一光子センシングが数多く報告されるようになり、これまでは実現できていなかった地上での水平距離 200km 越えの超長距離測距イメージング¹⁾や差分吸収ライダーによる温室効果ガス (CO₂) の面分布測定などの画期的な成果も報告されるようになった²⁻³⁾。SNSPD の長波長動作化の研究も進んでおり、近年 NICT の超伝導 ICT 研究室において、波長 2 μ m 帯用の SNSPD の開発に成功している⁴⁾。

NICT では、コヒーレント方式の水蒸気差分吸収ライダー（H₂O-DIAL）の開発を行い、風と水蒸気の計測性能の検証と実証を行った⁵⁾。現在では、更なる性能の向上のために、SNSPD を用いた直接検波方式の H₂O-DIAL の検討を進めている。本報告では、2 μ m 帯 SNSPD の性能評価及び CO₂ ガスセルを用いた CO₂ の R30 吸収線付近の吸収スペクトルの測定デモの結果を述べる。

2. SNSPD の性能評価

NICT の超伝導 ICT 研究室で開発された 2 μ m 帯用の SNSPD を 2 μ m 帯のコヒーレントライダー用に開発してきた単一波長レーザー⁶⁾を用いて評価した。レーザー光を直接 SNSPD に入射させると SNSPD が飽和するため、複数枚の減衰フィルターを用いて約 10 桁パワーを落としたうえで（ $\sim 10^6$ Hz 程度の光子レートに相当）SNSPD に入射させて、ライダー観測にとって重要なパラメータであるシステム検出効率（SDE）と暗計数率（DCR）の評価を行った（図 1）。

図 2 に実測した SDE と DCR のバイアス電流依存性を示す。今回の実験では、特性の異なる 2 種類の SNSPD について評価を行った。SNSPD は、2 K 近くまで冷却可能な GM 冷凍機内に収められており、光ファイバー越しに減衰させた 2 μ m 帯レーザー光を入力して評価した。SNSPD は 2 μ m 帯でも非常に高い検出効率（最大で 70% 以上）を持つことが確認できた。その一方で、可視光や通信帯波長と比べて、2 μ m 帯では常温付近の自然背景放射の混入が無視できないので、検出効率が高くなる高バイアス印加時には、2 種類の SNSPD 共に暗計数率が 1000 Hz 以上と非常に大きくなる（最大では 10000 Hz 以上になる）ことが分かった。直接

検波方式のライダーの場合、暗計数率が高いとライダー装置の SN が低下する．そのため、今後はバンドパスフィルターを SNSPD の手前の経路中に挿入して、SNSPD に入射する自然背景放射の光子数を抑制、暗計数率を低減する予定である．例えば、SNSPD を冷却するために使用する冷凍機内部のコールドステージ上に 10 nm のバンド幅を持つバンドパスフィルターを挿入することで、暗計数を ~ 100 Hz 程度まで低減することが可能である．バンドパスフィルターの挿入方法は、1) GM 冷凍機の内部のコールドステージに、光ファイバー結合のバンドパスフィルターを設置して挿入する方法、2) SNSPD 手前の光ファイバー端面にコーティングを施す方法、の 2 通りの方法で検討を進めている．

3. SNSPD を用いた CO₂ 吸収スペクトル測定

SNSPD のフォトンカウンティング性能を検証するために、 $\sim 10^6$ Hz 程度の光子レートに相当する微弱光を用いて、CO₂ の吸収スペクトルの測定を行った．実験系は図 1 と同様の物を用いており、複数枚の減衰フィルターを用いて減光したうえで、CO₂ ガスセル（長さ 300 mm, CO₂ ガス圧 30 torr）に入射させて、透過した光子数を SNSPD で計測した．レーザー光の一部をカプラーで取り出して、波長計（Burleigh, WA-1000）と積分球型のパワーメーター（Thorlabs, S148C）を用いて波長及びレーザー出力のモニターを行い、波長ごとのガスセルの透過率を導出した．

図 3 に SNSPD を用いて測定した CO₂ 吸収スペクトルを示す．また、比較として HITRAN データベース⁷⁾を用いて計算したスペクトルとサーマルパワーメーター（Ophir, 3A-SH）を用いて測定したスペクトルを示す．SNSPD を用いて測定した結果は、HITRAN による計算結果及び一般的なパワーメーターを用いて測定した結果と非常に良い一致を示した．バンドパスフィルターを用いて背景光子数を抑制することで更に微弱な光量での測定が可能となる．

4. まとめ

NICT では、コヒーレント方式の H₂O-DIAL の技術と 2 μ m 帯用の SNSPD を組み合わせた直接検波方式の H₂O-DIAL の検討及び開発を実施している．現在では、SNSPD の性能評価や DIAL システムに実装するための準備を進めている．今後は、SNSPD を実装した DIAL システムを用いて水蒸気計測実証を進める予定である．

参考文献

- 1) Z. P. Li et al.: Optica **8** (2021) 344.
- 2) B. Yue et al.: Remote Sens. **14** (2022) 5150.
- 3) W. Qiang et al.: Opt. Exp. **32** (2024) 19665.
- 4) F. China et al.: Opt. Exp. **31** (2023) 20471.
- 5) H. Iwai and M. Aoki.: Opt. Exp. **31** (2023) 13817.
- 6) 青木 誠, 岩井 宏徳: 第 41 回レーザセンシングシンポジウム予稿集 (2023) pp. 51-52.
- 7) R.V. Kochanov et al.: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **177** (2016) 15.

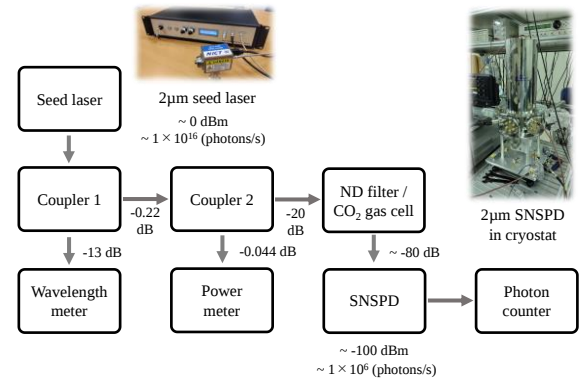


Fig. 1. Experimental system to evaluate SNSPDs

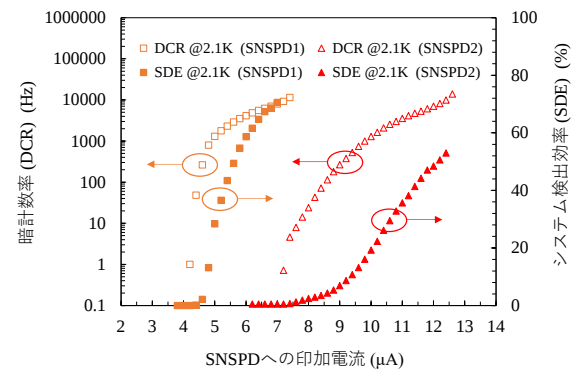


Fig. 2. Bias current dependences of SDE and DCR.

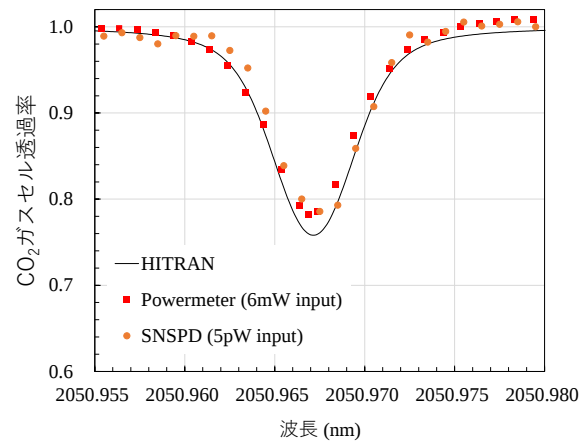


Fig. 3. Wavelength dependent transmittance spectra of CO₂ gas cell measured using SNSPD.