

通信波長帯光子検出技術とそれを用いた量子光技術の研究開発

Telecomm-Band Single-Photon Detector and Its Application to Quantum Optical Technologies

○行方直人¹*Naoto Namekata¹

Abstract: Quantum mechanics governs microscopic aspects of nature and is more fundamental than the “classical” mechanics. Technologies operating in the quantum regime have the potential to realize functions and performances that no classical technology can realize. The goal of demonstrating this potential is referred to as “quantum advantage”. We have focused on developing single-photon detectors at telecommunication wavelengths and their application toward achieving quantum advantage in information processing, communications, sensing, and imaging technologies. In this talk, recent progress in the single-photon detectors and their applications to the quantum optical tomography and the quantum walk simulation will be presented.

1. はじめに

量子力学はミクロの世界を記述するための道具であるが、その原理・性質を手段・媒体あるいはプロトコルのレベルで利活用した技術が創出されている。これを量子技術と呼び、具体的には、無条件に安全な通信を約束する量子暗号（量子鍵配送：QKD）、特定の計算を超高速に実現する量子コンピューター、そして究極的な感度・分解能を達成する量子計測が挙げられる。いずれもが（量子力学支配体制でないという意味で）古典的な既存技術では成し得ない性能・機能を実現し、これを量子優位性と呼ぶ。

我々は、「光」を媒体とする量子技術（量子光技術）の研究開発を進めてきた。量子光技術全般の基盤である単一光子検出器の開発^[1-3]から開始し、それを利用して量子光源（単一光子源、量子もつれ光子対源）^[4,5]、QKD^[6]、測定誘起型非線形量子操作^[7]、量子イメージング^[8,9]、そして量子ウォークシミュレーション（QWS）^[10,11]などへ展開してきた。

本発表では、単一光子検出器開発の現在地^[3]、最近の応用研究成果である量子パルスゲート（QPG）に基づく光断層撮影技術^[9]と QWS^[10,11]について紹介する。

2. 通信波長帯単一光子検出器

通信波長帯（真空中波長：～1550 nm）における単一光子検出器は光ファイバ伝送 QKD の受光器として精力的に開発され、現在においては、量子光技術全般の近赤外受光器として応用先が拡大している。実用的な通信波長帯単一光子検出器は InGaAs/InP の単一光子なだれダイオード（SPAD）をゲート動作させることによって実現する。しかし、SPAD 特有の雑音であるアフターパルスを抑圧するため、ゲート動作の繰り返し周波

数は 1 MHz 程度に制限されていた。この問題を解決するため、ゲート用電圧に正弦電圧を用いた「正弦電圧ゲート動作」^[1,2]を提案した。その結果、性能指数（光子検出効率～10%、暗計数確率 < 10⁻⁶/gate、アフターパルス確率～1%）を改善しつつも繰り返し周波数を 2GHz まで向上できた。さらには、高振幅正弦電圧ゲート動作手法を提案し、最終的に InGaAs/InP-SPAD が実現する光子検出効率上限は少なくとも 60%超であることを実証した^[3]。本結果は、超伝導光子検出器（SSPD）が実現する高い効率を実用的な InGaAs/InP-SPAD でも達成できる可能性を示唆している。

3. QPG に基づく光断層撮影技術

光干渉断層計（OCT）は、非接触かつ非侵襲で試料深さ方向の分解能 < 10 μm で試料内部を 3 次元可視化できる。眼底検査や皮下組織観察などの医療診断、材料内部欠陥の検査や膜圧管理などの産業応用に広く利用されている。OCT の信号感度の限界は参照光のショット雑音によって決まり、近赤外領域（1300 nm～1800 nm）の光を用いた場合の感度限界は、観測試料へ照射する光パワーを 8 mW（生体試料に対する安全基準）とすると、110 dB 程度である。生体試料は吸収・散乱が強く、この感度では試料表面から 1～2 mm 程度までしか観察できない。また、試料中での多重反射（散乱）光は深部観測における背景雑音となり、画像コントラストの劣化を引き起こす。一方、光断層撮影にはパルスレーザーによる飛行時間（TOF）計測が応用でき、加えて参照光を用いない直接光検出が可能となれば、既存 OCT を超える感度、分解能が達成できる。しかしながら、10 μm 以下の軸上（深さ）分解能を達成するためには、光検出（光子検出）に 100 fs 以下の時間分解能を

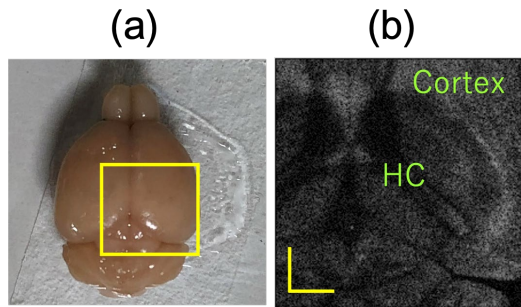


Figure 1. Tomographic images of a mouse brain.

(a) Scan area (the open square). (b) Scanning image of the horizontal area with a depth of 1.76 mm. Scale bar: 1.00 mm. HC, Hippocampus.

持たせる必要がある。そこで、QPGに基づく光周波数上方変換系を開発し、これにSi-SPADによる単一光子検出器をあわせて、フェムト秒時分解可能な単一光子検出技術を開発した。QPGの要請条件を達成し、ローレンツ関数状の基本時間波形モードのみを選択的に検出することに成功した。さらに、この光子検出技術を組み込んだTOF測定システムを構築し、デモンストレーションとしてマウス脳の断層撮影を試みた。Figure 1は灌流固定マウス脳の2次元平面スキャン像である。その深さは脳上表面から1.76 mmである。大脳皮質下の海馬部分(HC)までが明瞭に可視化できていることがわかる。古典限界をわずかに超える感度111 dBを達成し、今後の改善次第では140 dBが可能であることを見出した。

4. 連続時間QWSの実装

誤り訂正を必要としない中規模量子コンピューティング素子(NISQ)の1つであるQWSはグラフ検索問題の計算時間を2次高速化できると期待されている。我々は、QWS用プラットフォームとして長距離伝搬プラズモンポラリトン導波路アレイの利用を提案し、その原理検証として最近接結合1次元格子構造中の量子ウォーク挙動の観測に成功した^[10]。ごく最近では、周波数自由度を利用したQWSプラットフォームを新たに提案し、この原理検証実験に成功している。これまで実現が難しかった長距離相互作用、多次元、人工的外場制御を可能としており、パリティ対称性の破れた量子ウォーク挙動(時間発展)を実験的に明らかにした^[11]。

5. まとめ

通信波長帯単一光子検出器の開発からその応用研究、

特に量子優位性を達成する光技術の創成・開発を一貫して行ってきた。

6. 参考文献

- [1] N. Namekata, S. Adachi, and S. Inoue, "1.5 GHz single-photon detection at telecommunication wavelengths using sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode," *Opt. Express*, Vol.17, No.8, pp6275-6282 (2009).
- [2] N. Namekata, S. Adachi, and S. Inoue, "Ultra-Low-Noise, Gated Avalanche Photodiode for High-Speed Single-photon Detection at Telecommunication Wavelengths," *IEEE Photo. Tech. Lett.* Vol.22, No.8, pp529-531 (2010).
- [3] A. Tada, N. Namekata, and S. Inoue, "Saturated detection efficiency of single-photon detector based on an InGaAs/InP single-photon avalanche diode gated with a large-amplitude sinusoidal voltage," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol.59, No.7, 072004 (2020).
- [4] G. Fujii, N. Namekata, M. Motoyo, S. Kurimura, and S. Inoue, "Bright narrowband photon-pairs at an optical telecommunication wavelength using Type-II periodically poled lithium niobate waveguide," *Opt. Express*, Vol.15, No.20, pp12769-12776 (2007).
- [5] S. Arahira, N. Namekata, T. Kishimoto, H. Yaegashi, and S. Inoue, "Generation of polarization entangled photon pairs at telecommunication wavelength using cascaded $\chi^{(2)}$ processes in a periodically poled LiNbO₃ ridge waveguide," *Opt. Express* Vol.19, No.17, pp16032-16043 (2011).
- [6] N. Namekata, H. Takesue, T. Honjo, Y. Tokura, and S. Inoue, "High-rate quantum key distribution over 100 km using ultra-low-noise, 2-GHz sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiodes," *Opt. Express* Vol.19, No.11, pp10632-10639 (2011).
- [7] N. Namekata, Y. Takahashi, G. Fujii, D. Fukuda, S. Kurimura and S. Inoue, "Non-Gaussian operation based on photon subtraction using a photon-number-resolving detector at a telecommunication wavelength", *Nature Photonics*, Vol.4, No.9, pp655 - 660 (2010).
- [8] H. Hagihara, N. Namekata, K. Yokota, and S. Inoue "Near infrared single-photon imaging based on compressive sensing with a sinusoidally gated InGaAs/InP single-photon avalanche diode", *Proc. SPIE* 11295, 112950R (2020).
- [9] N. Namekata, N. Kobayashi, K. Nomura, T. Sako, N. Takata, and S. Inoue, "Quantum optical tomography based on mode-selective single-photon detection by femtosecond up-conversion," *Sci. Rep.* Vol.13, 21080 (2023).
- [10] N. Namekata, D. Wu, H. Hagihara, S. Ohnuki, D. Fukuda, and S. Inoue, "Continuous quantum walk in a 1-dimensional plasmonic lattice structure based on metal strip waveguides," *Opt. Express* Vol. 29, No.16, pp24899-24909 (2021).
- [11] S. Namekata, N. Namekata, S. Ohya, and S. Inoue, "Experimental Demonstration of High-Fidelity Continuous-Time Quantum Walks in a Synthetic Frequency Dimension with a Frequency-Stabilized Laser," *Conference on Laser and Electro-Optics / Pacific-Rim* 2024 (2024).