

前置光位相感応増幅を用いたリアルタイム直交位相振幅測定による
40 GHz 超広帯域 5 dB スクイズド光の観測
Over 40 GHz bandwidth real-time amplitude measurement of 5 dB squeezed light
by optical phase sensitive pre-amplification

NTT 先端集積デバイス研究所¹, 東大工², 理研 RQC³

○井上飛鳥¹, 柏崎貴大¹, 山嶋大地², 高梨直人², 風間拓志¹, 圓佛晃次¹,
渡辺啓¹, 梅木毅伺¹, 遠藤護^{2,3}, 古澤明^{2,3}

NTT Device Technology Labs¹, The University of Tokyo², RIKEN RQC³

○A. Inoue¹, T. Kashiwazaki¹, T. Yamashita², N. Takanashi², T. Kazama¹, K. Enbutsu¹,
K. Watanabe¹, T. Umeki¹, M. Endo², and A. Furusawa^{2,3}
E-mail: asuka.inoue.hy@hco.ntt.co.jp

はじめに

時間領域に多重化したクラスタ状態を用いる測定誘起型連続量量子コンピュータは、大規模で汎用な量子演算が実現できることから注目されている¹。また、光の広帯域性から高速クロック周波数での動作も期待される。この高速量子演算実現には、スクイズド光生成の広帯域化、および量子状態のリアルタイム直交位相振幅測定の広帯域化が必要になる。

これまで、二次元クラスタ状態生成に必要な 4.5 dB 以上のスクイズド光が THz 帯域にわたって生成されていることが、ある特定周波数における狭帯域な強度測定により確認された^{2,3}。しかし、量子演算に必要な DC から広帯域にわたるリアルタイム直交位相振幅測定は実現されていない。これは一般的に用いられるバランス型ホモダイン検出器(BHD)には量子効率と検出帯域にトレードオフがあり、広帯域検出器の大きな光損失により量子状態が壊れてしまうからである。そのため光通信等に用いられる高速な BHD をそのまま適用することはできず、光量子向けに開発された高速な BHD を用いても 9 GHz 帯域における 0.1 dB スクイズド光の観測にとどまっている⁴。

そこで直交位相振幅測定の広帯域化に向け、我々は BHD の前に光位相感応増幅器(PSA)を挿入する測定手法を提案してきた。前回、本手法により量子光への実効的な光損失を低減できることを実証し、光通信用 BHD の適用可能性を示した⁵。今回、43 GHz 帯域の光通信用 BHD を用いた量子ノイズの広帯域リアルタイム測定を世界で初めて実施したので報告する。

スクイズド光の高速直交位相振幅測定

提案手法の概念図を Fig.1 に示す。本手法では、原理的に信号雑音比が劣化しない PSA により測定成分のみを損失混入に耐えうるレベルまで増幅することで、光通信用高速検出器の使用を可能とする。スクイーズおよび PSA として、高い励起光耐性を有する直接接合型周期分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN)導波路を用いた。PPLN 導波

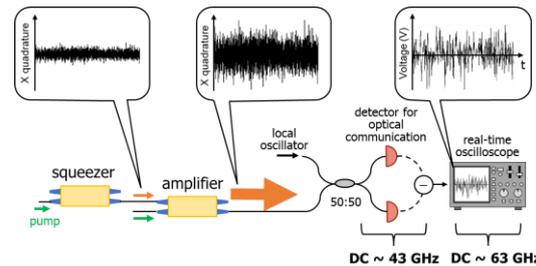


Fig. 1 Proposed broadband homodyne detection system using optical phase sensitive amplifier (PSA).

路により、THz 帯域を有する 6 dB 以上の連続波スクイズド光生成と³、雑音指数が約 1 dB で利得が 35 dB の高利得増幅が実現できる⁶。43 GHz 帯域の光通信用 BHD からの信号は、63 GHz 帯域の 160 GSa/s リアルタイムオシロスコープを用いて検出した。なお、高利得 PSA により本実験系の実効的な光損失は 92.4% から 0.4% まで低減されている。Fig. 2 (a) に真空場とスクイズド光の直交位相振幅測定結果を、Fig. 2 (b) に Fig. 2 (a) の電圧値のヒストグラムを示す。得られた直交位相振幅の分散値から、5.1 dB のスクイージングを確認した。これは二次元クラスタ状態生成に必要なスクイージングレベルを超える値である。また DC から 43 GHz にわたってリアルタイム直交位相振幅測定に成功したことを意味しており、数十 GHz クロック周波数での測定誘起型量子演算の実現可能性を示唆している。本結果は光量子技術と 5G に代表される高速光通信技術を融合させた最初の例であり、高速量子コンピュータの研究開発にパラダイムシフトを誘発するものである。

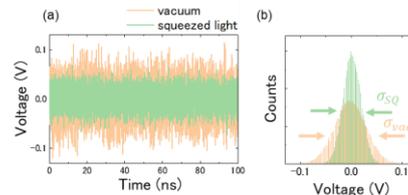


Fig. 2. (a) The original output voltage signal from real-time oscilloscope, (b) histograms of output voltages from (a).

- [1] S. Takeda and A. Furusawa, *APL Photonics* **4**, 60902 (2019).
- [2] R. Nehra *et al.*, *Science* **377**, 1333 (2022).
- [3] T. Kashiwazaki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **119**, 251104 (2021).
- [4] J. Tasker *et al.*, *Nature Photonics* **15**, 11 (2021).
- [5] 井上飛鳥他, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-A404-18.
- [6] T. Kazama *et al.*, *Optics Express* **29**, 18, 28824 (2021).