



光量子コンピュータの大規模・誤り耐性化に向けた広帯域・高レベルスクイズド光源技術

連続量光量子コンピュータでは、スクイズド光の広帯域化と高スクイージング化が、大規模化および誤り耐性化を実現するための重要な鍵となります。本稿では、周期分極ニオブ酸リチウム導波路型光パラメトリック増幅器を用いたスクイズド光生成技術について解説するとともに、低損失導波路加工技術や高精度位相安定化技術による10 dB超の高スクイージング、および約6 THzの超広帯域スクイズド光源の実現について紹介します。さらに、光量子コンピュータへの応用と今後の展望について述べます。

キーワード：#スクイズド光、#光パラメトリック増幅器、#周期分極反転ニオブ酸リチウム

かしわざき たかひろ やましま た い ち
 柏崎 貴大 / 山嶋 大地
 いのうえ あすか うめき たけし
 井上 飛鳥 / 梅木 毅伺

NTT先端集積デバイス研究所

スクイズド光と光量子コンピュータ

連続量 (CV: Continuous Variable) 光量子コンピュータでは、スクイズド光が量子計算のもっとも重要なリソース状態として用いられます。スクイズド光とは、光の波としての振動成分 (直交位相振動成分) に関して、ある位相の量子揺らぎ (量子雑音) がショット雑音以下まで圧縮された非古典的な量子状態

です (図1)。量子力学の不確定性原理により、直交する2つの位相の振幅成分の揺らぎを同時に小さくすることはできません。しかし、一方の揺らぎを小さくすることは可能であり、この状態を用いてさまざまな光量子技術を実現できます。

時間領域多重方式を用いた連続量光量子コンピュータ⁽¹⁾では、このスクイズド光を連続的に生成し、遅延干渉系によって大規模な量子もつれ状態 (クラスタ状態) を構築しま

す。この方式では、遅延干渉系を構成する光ファイバ内にどれだけ多くの時間モードを保有できるかが、生成可能なクラスタ状態の規模を決定します。したがって、光パケットを時間的にどこまで細かく定義できるかが重要であり、その性能はスクイズド光源の帯域幅によって決まります。帯域幅が広いほど時間幅の短いスクイズド光パケットを生成できるため、同じ長さの光ファイバでもより多くの量子モードを保有でき、

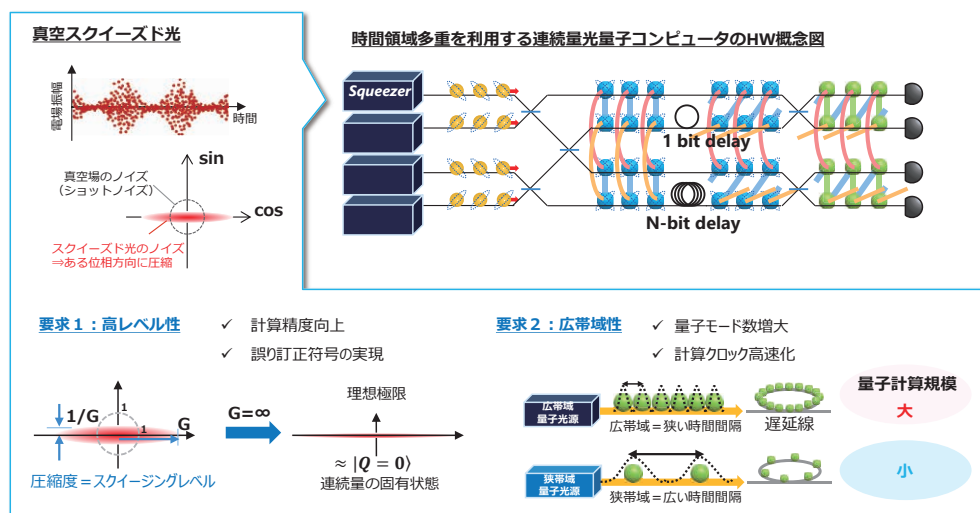


図1 スクイズド光の概念図と要求性能

光量子コンピュータの大規模化・高速化につながります。

また、スクイズド光には高いスクイーディングレベルも求められます。スクイーディングレベルとは、ショット雑音に対して量子揺らぎがどの程度抑圧されているかを示す指標であり、その値が大きいほどリソース状態に含まれる余分な量子雑音は小さくなります。連続量光量子計算では、この残留量子雑音が演算誤差として蓄積されるため、高いスクイーディングレベルを実現することが誤り耐性量子計算の実現につながります。近年では、GKP (Gottesman-Kitaev-Preskill) 符号を用いた量子誤り訂正方式において、10 dBを超えるスクイーディングレベルが重要な目標の1つとなっています。

このように、時間領域多重型光量子コンピュータでは、「広帯域性」が大規模化・高速化を、「高スクイーディング」が誤り耐性化を実現するための鍵となります。しかし、一般にこれら2つの性能を同時に実現することは容易ではありません。高いスクイーディングを得るために光共振器を用いると帯域幅は共振器線幅によって制限される一方、広帯域化を優先すると十分な非線形相互作用を得ることが難しくなります。そのため、「広帯域性」と「高スクイーディング」を両立したスクイズド光源の開発が、現在の連続量光量子コンピュータ研究における重要な課題となっています。

PPLN導波路型光パラメトリック増幅器

スクイズド光は、非線形光学効果を利用して生成されます。代表的な生成方法としては、三次非線形光学効果 (χ^3) を利用した四光波混合 (FWM: Four-Wave Mixing) と、二次非線形光学効果 (χ^2) を利用したパラメトリック下方変換があります。現在、連続量光量子コンピュータ用のスクイズド光源では、より大きな非線形係数を利用でき、かつ励起光と量子光を分離しやすいことから、二次非線形光学効果を用いた方式が広く採用されています。

二次非線形光学効果を利用する代表的なデバイスが、光パラメトリック増幅器 (OPA: Optical Parametric Amplifier) です。OPAでは、励起光 (ポンプ光) のエネルギーを利用して信号光の量子揺らぎを位相敏感に増幅・減衰させることでスクイズド光を生成します。高効率なスクイズド光生成を実現するためには、大きな二次非線形係数を有する材料と、高精度な位相整合技術が不可欠です。

NTTでは、この非線形媒体として周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate) 導波路を採用しています。ニオブ酸リチウムは大きな二次非線形光学係数を有する材料であり、その自発分極を周期的に反転させることで擬位相整合を実現できます。これにより、本来は位相

不整合によって失われる非線形相互作用を長距離にわたって維持でき、高効率なパラメトリック増幅が可能になります (図2)。

加えて、導波路構造を採用することで、光を数マイクロメートル程度の微小断面に閉じ込めながら数センチメートルに及び相互作用長を確保できます。その結果、バルク結晶と比較して非常に高効率な非線形相互作用を実現できます。

PPLN導波路は、光通信分野における光パラメトリック増幅器や波長変換器などの非線形光デバイスとして研究開発が進められてきました。NTTでは長年にわたり、低損失導波路形成技術、高品質な周期分極形成技術、高効率な光ファイバ結合技術などを蓄積してきました。これらの技術はスクイズド光源にもそのまま適用できるため、光通信分野で培ったデバイス技術を量子情報処理へ展開する研究を進めています。

さらに、導波路型OPAは、従来広く用いられてきた光共振器型スクイズド光源とは大きく異なる特徴を有しています。光共振器型では、高いスクイーディングレベルは得やすいものの、スクイズド光の帯域幅は共振器の線幅によって制限されるため、時間領域多重量子計算に必要な広帯域化には限界があります。一方、導波路型OPAでは光共振器を必要としないため、位相整合帯域が許す限り極めて広帯域なスクイズド光を生成できます。この特徴は、時間領域多重型光量子コンピュータ

周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路

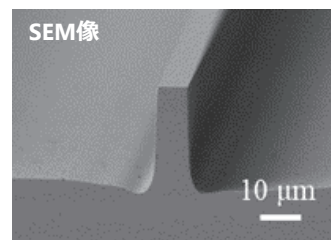
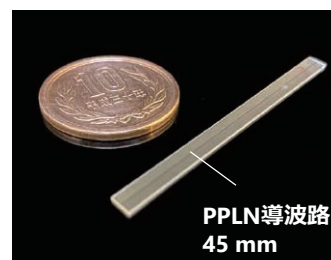
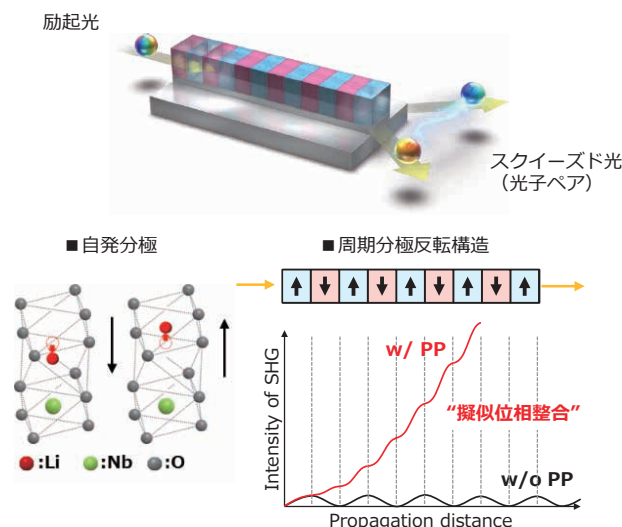


図2 周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路

に必要な超広帯域スクイズド光源を実現するうえで大きな利点となります。

しかしながら、高効率なPPLN導波路を実現するだけでは、高品質なスクイズド光源は完成しません。高いスクイーディングレベルを実現するためには、非線形相互作用の増強だけでなく、導波路そのものの伝搬損失や光学系全体の損失を低減するとともに、高精度な位相安定化技術を実現する必要があります。次に、NTTが取り組んだ高レベルスクイズド光の生成検出技術について紹介します。

広帯域高レベルスクイズド光生成

スクイーディングレベルは、非線形相互作用の大きさに加え、導波路の伝搬損失、光学系全体の損失、受光系の検出効率、さらには測定位相の

揺らぎなど、さまざまな要因によって制限されます。そのため、高スクイーディング光源の実現には、デバイス、光学系、および制御技術を総合的に最適化することが必要となります。

まず重要となるのが導波路の低損失化です。スクイズド光は光損失に極めて敏感であり、導波路中で発生するわずかな伝搬損失であっても、観測されるスクイーディングレベルは大きく低下します。そのため、非線形効率を高めるだけでなく、導波路そのものの損失を可能な限り低減する必要があります。NTTでは、PPLN導波路の加工方法として、一般的に用いられるドライエッチング法ではなく、ダイシングソーによる機械加工技術を採用しています。ダイシングソー加工では、導波路側壁の表面粗さを低減できるため、散乱損失を抑制できます。実際に作製した導波路では、従来構造と比較して

低損失化を実現するとともに、高効率な光パラメトリック増幅が可能であることを確認しました⁽²⁾。この導波路技術は、その後の高スクイーディング化を支える重要な基盤技術となっています。

高スクイーディング領域では、励起光、スクイズド光、およびホモダイン検波に用いる局部発振光 (LO: Local Oscillator) の相対位相の制御も重要になってきます。これは高スクイーディング領域では必然的にアンチスクイズド成分も大きい状態となり、相対位相がわずかに変動しただけでも、観測されるスクイーディングレベルが大きく低下してしまうからです。特に10 dBを超える領域では、数ミリラジアン程度の位相揺らぎでも性能劣化が顕著となるため、高精度な位相安定化が不可欠となります。位相同期には励起光をPPLNに入射する際に位相基準となるプローブ光も同時に入射します。この

プローブ光を検出する際に、スクィーズド光生成PPLNの出射光から一部の光信号を抜き取ることで位相誤差信号を生成していました。

一方、この方式ではスクィーズド光も一緒に取り出してしまうため、取り出す光強度を抑える必要がありました。しかし、取り出す光強度を抑えてしまうと、位相誤差信号の信号対雑音比が劣化してしまい、高精度の位相制御の妨げとなっていました。

そこで、スクィーズド光用のPPLNとは独立した位相誤差信号生成用のPPLNを準備することで、従来の光損失と位相誤差劣化のトレードオフを解消する新しい位相安定化方式を採用しました⁽³⁾ (図3)。本方式により、スクィーズド光を損失させることなく、高い光強度を持つ位

相誤差信号が生成可能となり、従来よりも小さな位相誤差で測定できます。

これらの低損失導波路技術と高精度位相安定化技術を組み合わせることで、近年、導波路型OPAを用いて10 dBを超えるスクィージングの直接観測に成功しました⁽³⁾。本成果は、導波路型スクィーズド光源として世界トップレベルの性能を示すものであり、誤り耐性連続量量子計算に求められるスクィージングレベルを実証した重要な成果です。

加えて前述のとおり、時間領域多重型量子コンピュータでは、高スクィージングに加えて広帯域性も重要な性能となります。作製したPPLNを用いて広帯域性を評価したところ、約6 THzという極めて広い帯域幅を有するスクィーズド光の生

成を確認しました⁽²⁾。この帯域幅は、従来の光共振器型スクィーズド光源を大きく上回るものであり、時間領域多重技術を用いる光量子計算に必要な超広帯域スクィーズド光源として有効であることを示しています。この広帯域性を活かすことで、例えばシュレディンガーの猫状態といった、汎用量子計算には欠かせない非ガウス状態の高速生成などにも成功しています⁽⁴⁾。

光量子コンピュータ実用化に向けた取り組み

スクィーズド光源を実用的な光量子コンピュータへ適用するためには、高性能化に加え、高い安定性と再現性を実現することも重要です。NTTでは、PPLN導波路と光ファイバを

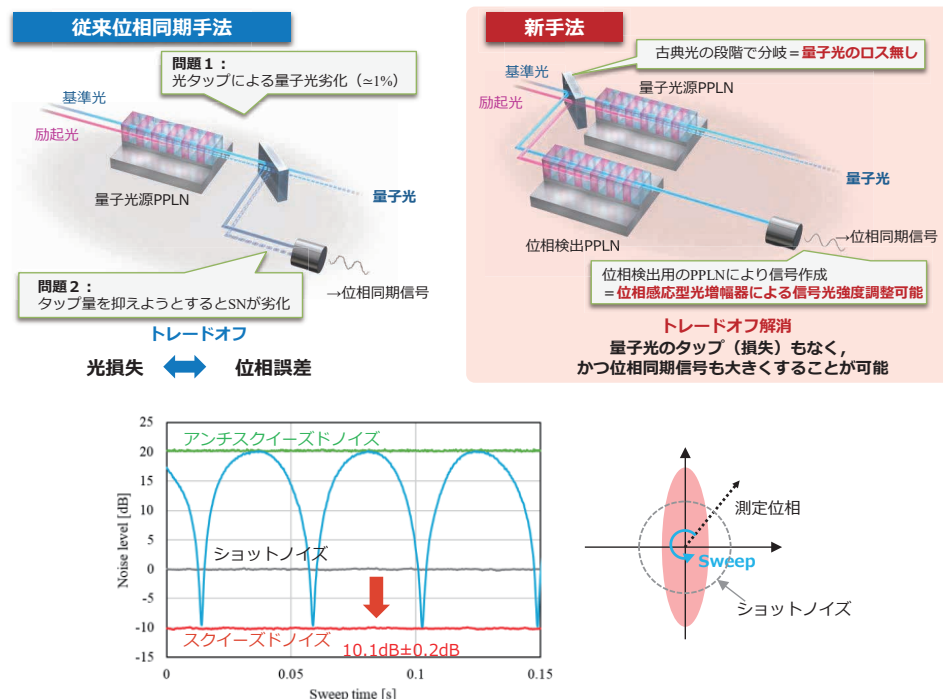


図3 新規位相同期手法と10 dBスクィージング⁽³⁾

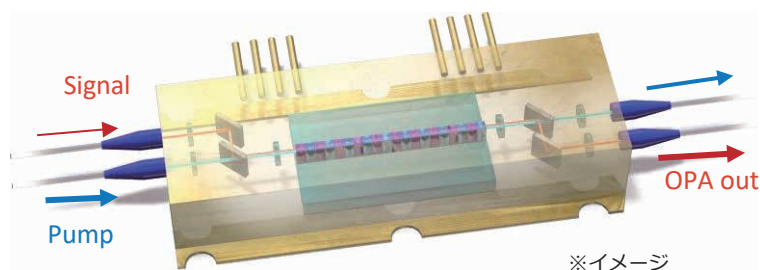


図4 PPLN モジュール

高精度に接続した光モジュールを開発し、長時間安定に動作するスクイーズド光源を実現しています(図4)。導波路のモジュール化は、小型化に加えて、光軸調整を必要最低限として、環境変動に対する安定性や保守性も向上させることができます。このような技術は、多数のスクイーズド光源を並列に利用する将来の光量子コンピュータにおいて重要な役割を果たすと期待されています。

本光源を用いて、2025年には理化学研究所において時間領域多重方式を採用した連続量光量子コンピュータの運用が開始されました⁽⁵⁾。同システムでは、101モードの線形量子演算が可能であり、今後、汎用量子計算へ拡張される予定です。

まとめと今後の展望

本稿ではPPLN導波路を用いた、連続量光量子技術の最重要リソースとなる広帯域かつ高レベルなスクイーズド光の生成に関して解説しました。本稿で紹介したPPLN導波路

技術は、光通信分野で培われた非線形光デバイス技術を量子情報処理へ展開した代表例です。今後も広帯域化、高スクイージング化、さらには光集積化を進めることで、大規模・高速・誤り耐性型光量子コンピュータの実現に貢献していきます。

参考文献

- (1) W. Asavanant and A. Furusawa: "Optical quantum computers: A route to practical continuous variable quantum information processing," AIP Publishing LLC, 2022.
- (2) T. Kashiwazaki, T. Yamashita, N. Takanashi, A. Inoue, T. Umeki, and A. Furusawa: "Fabrication of low-loss quasi-single-mode PPLN waveguide and its application to a modularized broadband high-level squeezer," Appl. Phys. Lett., Vol.119, 251104, 2021.
- (3) K. Hirota, T. Kashiwazaki, G. Ha, T. Yamashita, P. Jaturaphagorn, T. Suzuki, K. Takahashi, A. Kawasaki, A. Inoue, W. Asavanant, M. Endo, T. Umeki, and A. Furusawa: "Generation of 10-dB squeezed light from a broadband waveguide optical parametric amplifier with improved phase locking method," Opt. Express, Vol.34, pp.7958-7966, 2026.
- (4) A. Kawasaki, R. Ide, H. Brunel, T. Suzuki, R. Nehra, K. Nakashima, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, F. China, M. Yabuno, S. Miki, H. Terai, T. Yamashita, A. Sakaguchi, K. Takase,

M. Endo, W. Asavanant, and A. Furusawa: "Broadband generation and tomography of non-Gaussian states for ultra-fast optical quantum processors," Nat. Commun., Vol.15, 9075, 2024.

- (5) S. Yokoyama, A. Sakaguchi, W. Asavanant, K. Takase, Y.-R. Chen, H. Nagayoshi, J. I. Yoshikawa, T. Kashiwazaki, A. Inoue, T. Umeki, T. Hashimoto, T. Hiraoka, A. Furusawa, and H. Yonezawa: "Full-stack analog optical quantum computer with a hundred inputs," arXiv:2506.16147, 2025.



(左から) 梅木 毅伺/ 柏崎 貴大/
井上 飛鳥/ 山嶋 大地

これまで使いやすいコヒーレント光源(レーザー)の誕生により爆発的に光産業が発展してきました。誰でも使える量子光源(スクイーズ)の実現は量子光産業を爆発的に発展させ、社会をより良くすると信じています。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
機能材料研究部
異種材料融合デバイス研究G