

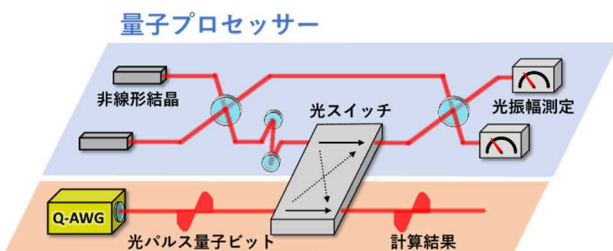
研究開発テーマ名

時間領域多重汎用量子コンピューティングに関する研究開発

2022年度までの進捗状況

1. 概要

量子コンピュータの実用化に向けさまざまな物理系で研究が進んでいます。多くの物理系では、実用的な量子計算の実行に非常に複雑な量子プロセッサが必要な点が課題です。一方で、光量子コンピュータはコンパクトな量子プロセッサで実用的な量子計算を実行できます。このような量子プロセッサはすでに実証済みであるため、今後は量子ビットを生成する光源が主な開発要素になります。量子ビットの生成システムとして、これまでに量子任意波形発生器(Q-AWG)を提唱しました。Q-AWGは、任意の光量子状態を任意のパルス波形で出力する汎用量子光源です。Q-AWGは高い汎用性を持つことから、実用的な光量子コンピュータの基幹光源となるのはもちろん、実用化に至るまでに生じる多様な課題を解決することが可能です。Q-AWGはまさに「究極の量子光源」であり、実現すれば光量子コンピュータの開発は大きく加速するでしょう。

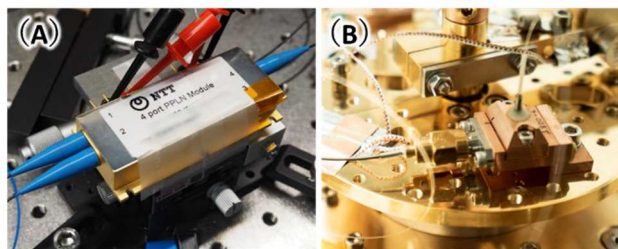


量子ビットの入力&取り出し

光量子コンピュータの概念図。量子プロセッサと量子任意波形発生器(Q-AWG)からなる。

2. 2022年度までの成果

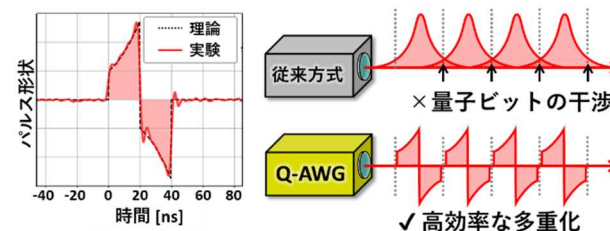
当該年度には、目的に応じて量子光のパルス波形を自在に制御する新手法を開発し、Q-AWGの基礎技術を確認しました。さらに本手法により、光量子プロセッサの作動に必要な特殊なパルス波形を持つ量子ビットを生成しました。これまでは、任意のパルス波形を実現することや、量子光の損失を抑えつつパルス波形を制御することが困難でした。そこで当該年度では、非常に周波数広帯域な量子もつれ光を介して間接的にパルス波形を制御する新手法により、これらの課題を解決しました。広帯域量子もつれ光の生成には、前年度に開発した光パラメトリック増幅モジュールを利用しました。また、生成する量子ビットに強い量子性を与えるために、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器を利用しました。これらのデバイスは光通信技術と深い関わりがあり、当該年度は異分野融合による量子技術開発の加速が顕著だったと言えます。



(A) 光パラメトリック増幅モジュール
(B) 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器

本手法で生成した量子ビットは、バランス型タイムビン波形と呼ばれる特殊なパルス波形を持ちます。この波形は光量子プロセッサの作動に必要なとされながら、本手法以前は実現方法が知られていませんでした。今回の成果により量子プロセッサに量子ビットを入力することが可能になり、

光量子計算のデモンストレーションを行う展望が開けました。さらにバランス型タイムビン波形は、両端に裾野を引かない特徴的な形状を持っています。これにより量子ビットの間隔を従来方式よりも狭くでき、量子プロセッサに大量の量子ビットを入力可能になります。現在利用している光パラメトリック増幅モジュールの潜在能力を最大限に活用すれば、最大で10億個もの量子ビットが入力できます。これは大規模化が課題とされる他の物理系を圧倒するスケールであり、量子コンピュータの実用化に向けたゲームチェンジャーとなる成果と言えます。



量子プロセッサの作動に必要なかつ量子ビットの多重化に適したバランス型タイムビン波形の実現

3. 今後の展開

今後はQ-AWGと量子プロセッサを融合し、光量子コンピュータの実機開発やクラウド化などの実用に向けた開発を進めます。それと同時にQ-AWGを高度化し、誤り耐性の高い量子ビットの生成を目指します。これら二つの方針により、誤り耐性型大規模汎用量子コンピュータの実現が着実に近づくでしょう。さらに、本研究のように光通信の優れた技術プラットフォームを積極的に活用することで、上記の技術開発はこれまでにない急激さをもって進展すると考えられます。

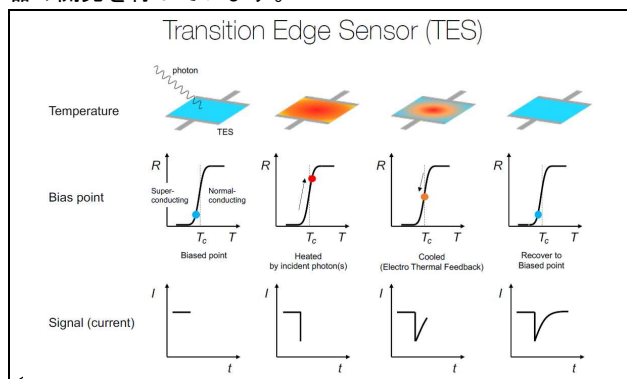
研究開発テーマ名

超伝導光子数識別器に関する研究開発

2022年度までの進捗状況

1. 概要

GKP 量子ビットの生成のためには、高次の非線形光学過程の実現が必要となります。本プロジェクトでは、超伝導光子数識別器を用いた測定誘起型でこれを実現します。具体的には、スクイズド光とビームスプリッターにより量子もつれを生成し、量子もつれの一部で超伝導光子数識別器を用いて所定の光子数を検出することで、GKP 量子ビットを生成します。この GKP 量子ビットが生成されるのは、所定の光子数が検出された瞬間なので、これを任意のタイミングで使うためには、量子メモリーも必要となります。本研究開発課題は、このための光子数識別器の開発を行っており、光量子コンピュータのクロック周波数 1GHz 相当の動作帯域を目指して高速で光子数情報を取得可能な検出器の開発を行っています。

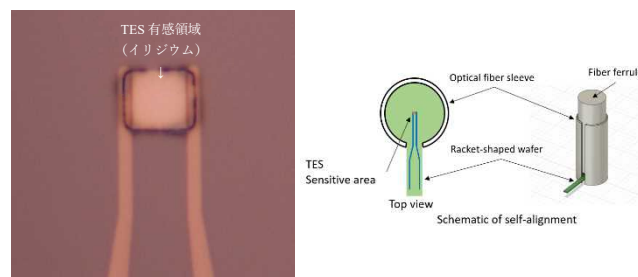


通信波長帯の単一光子計測が可能かつ、多数の光子数を識別可能なダイナミックレンジの広い光センサとして、超伝導転移端センサ(Transition Edge Sensor: TES)があります。

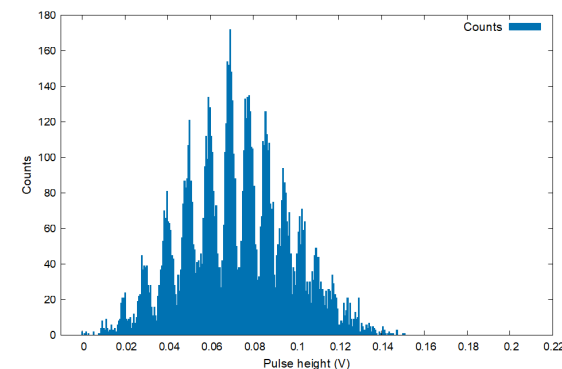
TES は、図に示すように、超伝導体の薄膜に電流を流しつつ適切に温度制御することにより、常伝導状態から超伝導状態に移行する途中の領域である超伝導転移端に保持し、この状態で近赤外光子が薄膜に吸収された際に生じる温度上昇を電流変化として読み出すことで、光子入射により吸収されたエネルギーに比例した信号を得るものです。本研究開発課題では、光量子コンピュータに対応した TES の高速動作を実現するために、電流変化をもたらす原因となる温度変化がセンサ全体で瞬時に生じるようにセンサのサイズを極小化したデバイスを製作します。センサのサイズを小さくすると同時に熱容量も小さくなるため、温度上昇も大きくなり、S/N 比の向上と信号の高速化と光子数の同定にも寄与します。

2. 2022年度までの成果

下左図に、本研究において製作した $8\mu\text{m}$ 角の TES の写真を示します。TES はシリコン基板上に形成し、光学部品のサイズに合わせた外形になるように加工し、セルフアラインメントで光ファイバとの位置合わせができるようにします。このようにして製作した TES の光入射による応答は立ち上がり時間 16.2ns を示し、信号帯域として、 20MHz 以上が得られることを確認しました。



TES は、原理的に吸収したエネルギーに比例する大きさの電流変化を生じます。単一の波長の光子を計数する場合は、光子数に応じた離散的なエネルギーが入力されるために、信号強度を横軸にとったヒストグラムを作成すると、入射した光子数に応じたピークが生じます。下図はこれを示したのですが、多数の近赤外光子を弁別して計測できていることがわかります。



3. 今後の展開

シミュレーション計算においては、立ち上がり時間 300ps 、信号帯域 1.2GHz が予想されており、素子の微細化をさらに進める予定です。フォトリソグラフィによるセンサ製作では素子の微細化が難しいため、Focused Ion Beam (FIB) を用いたセンサ形状の加工を進めています。FIB では、微細な構造を任意に形成することが可能であるため、センサ設計の自由度が大きくなり、アレイ構造などの複雑な構造をもつ素子製作が可能となり、高速化に資することが期待されます。また、信号読み出しに関しては、現状の超伝導量子干渉素子(SQUID)による読み出し回路では信号帯域の制約があるため、より高速な回路の開発を行っています。

研究開発テーマ名

導波路光パラメトリック増幅器および光量子導波路回路に関する研究開発

2022年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発テーマは、量子テレポーテーションチップの実現を目指します。これにより、光量子状態の質を高め、光量子情報処理を安定化し、目標6並びに本プロジェクトの目標である誤り耐性型大規模汎用量子コンピュータの実現に貢献します。目標達成に向けては、光を操作するためのデバイス特性の向上が重要です。本テーマでは、光通信向けに極限まで性能を向上させてきた導波路型PPLN(周期的分極反転ニオブ酸リチウム)技術とPLC(石英系平面波回路)技術を光量子情報処理に適用して目標達成を目指しています(図1)。これらの技術をもとにスクイージングレベル 10dB のスクイズド光の生成や忠実度 8.3 の光量子テレポーテーション回路の実現を目指しています。

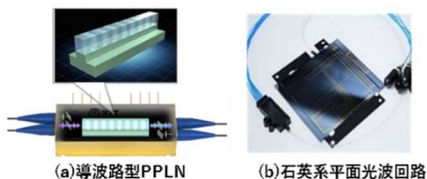


図1 光量子情報処理に用いる光通信向けデバイス技術

2. 2022年度までの成果

- ① PPLN 導波路型スクイザで 10THz 級の透過帯域と 8dB 超のスクイージングレベルを達成
 - ② 損失 0.5dB の PLC 型ユニバーサルスクイザを作製
 - ③ PPLN 導波路位相感応増幅器で帯域 43GHz のリアルタイム測定を実証
- 各成果の詳細は以下の通り：①は PPLN 導波路型スクイ

ザの低損失化により導波中の変換効率を極限まで高め、共振器構造を不要にして周波数依存性を低減し光の伝送帯域と同等の 10THz 級の帯域を世界で初めて実現し、さらに、8dB を超えるスクイージングレベルも達成しました(図2)。

②は量子テレポーテーション回路にスケールアップ可能な PLC 型ユニバーサルスクイザ回路で損失を徹底的に低減し 0.5dB 程度に損失を抑えられることを確認しました(図3)。

③では射影測定の基本となる直交位相振幅検出において、帯域制限やノイズ源となる後段の電気のアンプの代わりに、PPLN 導波路の位相感応増幅器を前置増幅器として用いることで 43GHz 帯域で量子状態の計測が可能であることを世界に先駆けて示しました(図4)。

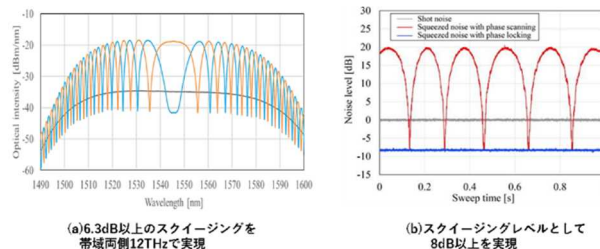


図2 PPLN 導波路モジュール特性

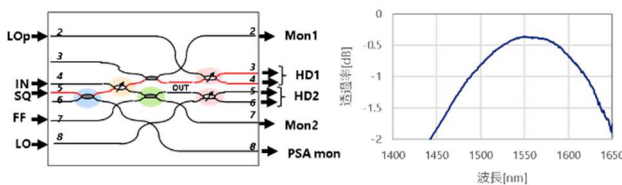


図3 PLCによるユニバーサル回路と透過特性

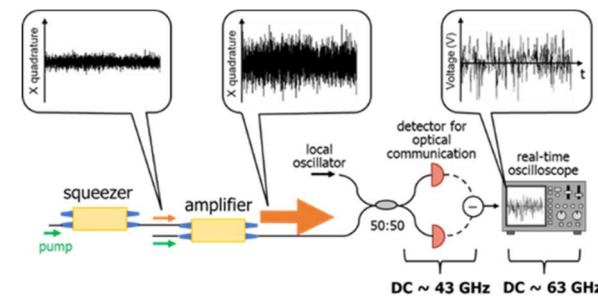


図4 PPLN 導波路前置増幅直交位相振幅測定系

3. 今後の展開

2022年度までの成果をさらに発展させ、目標とするデバイス特性の実現を目指します。一方、可能な限り早期に量子コンピューティングを実証するという観点から、現時点では PLC を用いた集積回路による量子コンピューティングの実証は困難であると判断して、PPLN 導波路モジュールを空間光学系や光ファイバ系と組み合わせて、プロジェクト内の他の研究開発テーマと連携して光量子コンピュータの実証系の実現に貢献していきます。

参考文献

- 1) T. Kashiwazaki, et al., Appl. Phys. Lett. 119, 251104 (2021)
- 2) T. Kashiwazaki, et al., Appl. Phys. Lett. 122, 234003 (2023)
- 3) A. Inoue, et al., Appl. Phys. Lett. 122, 104001 (2023).