

研究開発項目

1. 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

2023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、汎用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。量子計算を行う量子もつれとしてクラスター状態を用います。クラスター状態はスクイーズド光を用いて生成します。本プロジェクトでは、共振器構造を持たない導波路光パラメトリック増幅器(OPA)を開発してきており、広帯域スクイーズド光の生成が可能です。導波路光パラメトリック増幅器をファイバー光学系に組み込み、光強度損失を低減し、数 THz の帯域で 8dB を上回るスクイーズド光の生成が可能となっています。数 THz の広帯域の側帯波に周波数間隔 100 GHz 程度の櫛状のスペクトルを持つ L0 光を約 100 個入れることは、クロック周波数 40GHz、100 コアのスーパー量子コンピュータとも言えるものです。これをクラウドコンピュータとして用いていこうとしています。

非ガウス操作のための技術として、光パラメトリック増幅用光導波路モジュール・ユニット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所定の光子数を検出することにより、低近似魔法状態を生成し、Gottesman-Kitaev-Preskill (GKP) 量子ビットの生成を試行しています。

2. これまでの主な成果

数 100THz のキャリア周波数を持つ光量子情報処理システムは、情報の読み出しを行うホモダイン測定器によって

帯域がわずかに数 100MHz に律速されてきました。そこに 5G 通信技術を用いることにより数 10GHz 帯域のホモダイン測定器を実現いたしました。それでも効率が低く、強度損失に脆弱な量子光への応用は困難です。量子光に光位相敏感増幅を補助的に用いて、ロス耐性を向上させ、5G ホモダイン測定器を用いて 70 GHz 帯域までの量子もつれ状態の生成と検証を行ないました。また 6 THz の光源、6 THz の位相敏感増幅器、66 GHz のホモダイン測定器で、生成レート 0.9 MHz で波束幅が 1ns 以下の状態の生成を行いました。この生成レートは、用いた超伝導光子検出器のタイミングジッタが大きな律速であって、系の 66GHz の帯域がなおも 1GHz に制限されているためです。

超伝導ナノストリップ型光子検出器 (SNSPD) は高い検出効率を有し、高速動作可能な光子検出器であり、この超伝導ナノストリップ型光子数識別器を使用し非ガウス型量子状態の生成に成功しました。超伝導検出器の性能による制約を取り除ければ、GHz 帯、あるいは THz 帯域の状態生成は OPA によって実現できることがわかりました。

本手法を初めて量子トモグラフィに応用し、シュレディンガーの猫状態の生成を行いました。古典的な状態であるコヒーレント状態の重ね合わせ(シュレディンガーの猫状態)の近似状態が生成されたのです。さらにパルス光のスクイーズド真空場の時間-周波数モードの性質を理論的に解析し、低光学損失のパラメトリック増幅器、超伝導転移端センサの 4 光子測定、位相ロックシステムを用いて、世界初の 4 光子引き去りによる非ガウス型状態生成の実験に成功しました。生成された量子状態は 1GHz の帯域を有しており、従来の非古典的量子状態生成の約 100 倍の広帯域化に成功しています。

誤り耐性型量子計算を実現する有望な手段は、光進行波中に GKP 量子ビットを生成することです。光子数測定を利用して光 GKP 量子ビットの生成を世界で初めて実証した結果を図に示します。図中のピーク構造すなわちピークの数

および鋭さが GKP 状態の質を特徴づけるものです。同じ方法を反復することでピークの数が増えて、質の高い GKP 状態を実現できると期待されます。

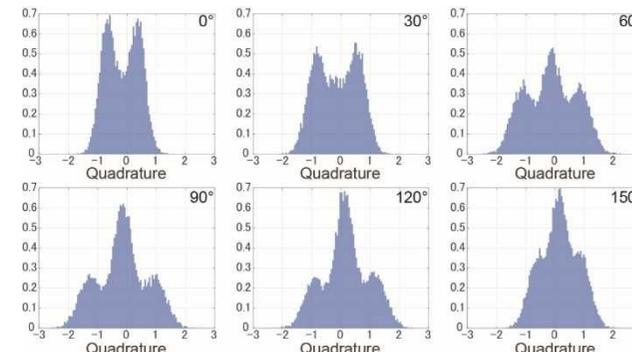


図 生成した誤り訂正のための電磁場の分布構造観測結果

3. 今後の展開

平均光子数が少ないため荒い近似の GKP 量子ビットの生成レートは数 Hz であり、まだ非常に低いので実用化への課題となります。光子数測定器の量子性を効率よく利用し、GKP 量子ビットの生成レートを 100 万倍以上改善することに取り組んでいます。

研究開発項目

2. 超伝導光子数識別器に関する研究開発

2023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、スクイー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、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。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、入射した光子数に応じたピーク数が生じます。今年度の実施内容としては、光子数識別器の試作機の開発を行い、初期性能の条件出しをしました。

2. これまでの主な成果

図1左に、本研究において製作した 8 μ m 角の TES の電子顕微鏡写真を示します。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 16.2 ns を示し、信号帯域として、20 MHz 以上が得られることを確認しました。

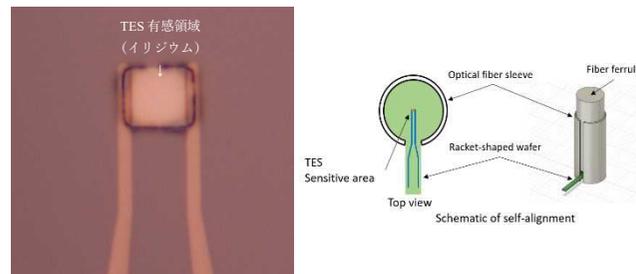


図1 TES 写真とセットアップ概略図

センサの読み出し回路を低温で動作させた HEMT (High Electron Mobility Transistor) 回路で直接読み出しを行うことで、高速化が達成できることを示しました。冷凍機の 3K ステージ上に低温での特性を踏まえて製作した増幅回路を設置し、TES から得られる光信号の読み出しを行いました。この結果、図2の 1550nm のレーザー光を照射して実測したデータに示されているように、立ち上がり時間は 10%-90%において 12.2 ns となりました。したがって、これから計算される動作帯域としては、 $0.35/12.2 \text{ ns} = 28.6 \text{ MHz}$ が算出されます。当初の目標としては、動作帯域 10 MHz

を目標としていたので、それ以上の値を達成することができました。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。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。

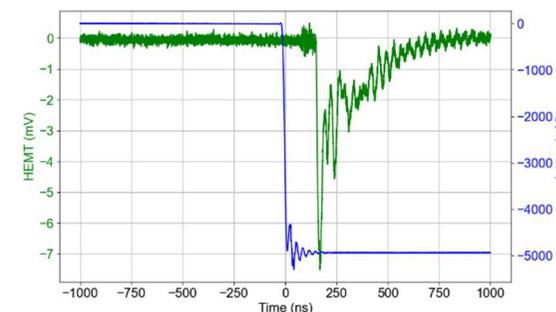


図2 測定されたレーザーパルスに対する立ち上がりの応答信号

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 300 ps、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ます。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なので、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、高速化を期待できます。

研究開発項目

3. 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

2023年度までの進捗状況

1. 概要

導波路光パラメトリック増幅器および光導波路による、量子テレポーテーション動作に向けて、導波路光パラメトリック増幅器および光導波路の性能改善を継続するとともに、これまで得られたデバイス技術に関する知見を基に、研究課題1と連携して量子テレポーテーションさらには量子コンピューティングを実現するためのシステム構成および現段階でのデバイス性能の適用可否の検討を進め、システム化に向けた検討をしています。検討過程ではあるものの、課題1および課題4で構築を目指している光量子コンピュータ実機向けに、本研究開発中の導波路光パラメトリック増幅器を年間20台以上作製することができています。さらなる各要素デバイスの検討を継続して進め特性改善の検証を実施しています。

2. これまでの主な成果

(1) 導波路光パラメトリック増幅器による広帯域・高レベルスキューズド光源の検討

20台以上作製している導波路光パラメトリック増幅器は、約90%の歩留まりで、指標として設けた透過損失1.5dBを下回る低損失なモジュールとして作製できました。量子もつれ生成実験、非ガウス状態の生成実験に組み込み、実機への適用可能性も確認できました。また昨年度実証した高速な量子受信技術に関して、従来では利得30dB以上となる特別仕様の光パラメトリック増幅器で実験を実施していましたが、利得に対する損失耐性の精査ができましたので、特別仕様でない安定製造可能なデバイスでも充分適用可能であることもわかりました。

また、導波路光パラメトリック増幅器の高性能化に向けた課題抽出として、導波路構造のばらつきによる出射ビームの形状が干渉ビジビリティの劣化を引き起こすことを確認

し、高レベルスキューズド光実現に向け改善をはかりました。広帯域化に向けては光導波路を短くすることで達成できることが知られていたため、短尺化にも取り組み、図1のように従来よりも短尺なモジュールを作製しました。



図1 光パラメトリック増幅器の外観図 (上) 従来のモジュール (下) 新規に作製した短尺のモジュール。

(2) 石英系平面光波回路による量子テレポーテーションに向けた回路設計と評価の検討

昨年度はVH Δ -PLC(ファイバと整合させてコアとクラッドの屈折率のコントラストを高くした比屈折率差1%程度の光導波路)での回路検討を行いました。要素回路としてはM Δ -PLC(屈折率のコントラストの低い比屈折率差0.4%程度の光導波路)の場合と同等の特性を得られることを確かめました。引き続きVH Δ -PLCを用いて低損失化の検討を継続しています。

量子テレポーテーションで用いられる光量子動作を基本的な光学系を持つPLCの検証として、EPRペア生成向けPLCを作製し、PLCの低損失化の検証を進めました。

VH Δ -PLCを用いて、EPR生成向けPLCを作製し、その透過特性を確認しました。回路構成を図2(a)に、コインと比較した写真を図2(b)に示します。スキューズド光が通過するパス(図2(a)の赤青線)で受ける損失は、光回路内部で0.7dB、光回路とファイバの接続部両側で0.2dB、合計0.9dBです。この損失には、伝搬損失0.006dB(単位伝搬損失0.02dB/cm、回路長さ0.3cmとしたときの値)と要素回路の計算上の損失が含まれています。残りの損失を低減するには要素回路自体の損失を抑制するような取り組みが必要です。このPLCへスキューズド光を伝搬させると、出力されるスキューズド光のスキューズングレベルは約5.7dB(入力スキューズングレベルを10dBとしたときの値)と推定され、この値は、識別できるスキューズングレベルです。よってEPR生成の動作検証が可能です。

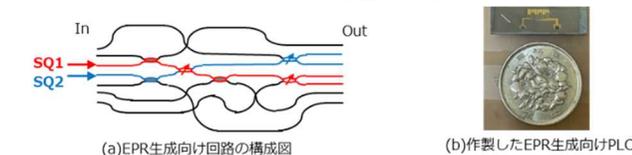


図2 EPR生成向け回路の構成図と実物写真

3. 今後の展開

量子光源の広帯域・高スキューズングレベル光源および光量子状態の高速測定の実証を優先的に検討し、その基盤となる導波路光パラメトリック増幅器および光導波路回路技術の高度化に取り組みます。

研究開発項目

4. 光量子コンピュータの社会実装に関する研究開発

2023年度までの進捗状況

1. 概要

光量子コンピュータでは、時間領域多重を用いることでコンパクトな系でスケラブルな量子計算を実現できます。そのため量子コンピュータ実現の有力候補と考えられます。課題推進者1のグループと協同して、光量子コンピュータの開発と社会実装を目指し研究開発に取り組んでいます。それをクラウドコンピュータとして運用し、ハードウェアの構築をするとともに、コンパイラ、アセンブラの開発を含めるマン・マシン・インターフェースも構築していくことも目的としています。

光量子コンピュータの開発要素は、大規模な汎用量子計算のためのシステムの構築と、誤り耐性を獲得するための補助状態の生成に分けて考えられます。本研究では、まず大規模汎用量子計算のためのプラットフォームの作製とクラウド公開のための準備を行っています。具体的には光導波路を用いて、広帯域な量子リソースを生成し、さらに時間領域多重化手法を用いて大規模クラスター状態を生成しています。

2. これまでの主な成果

課題推進者1のグループで研究されてきた時間領域多重の技術を利用することで、他の方法では現状不可能な大規模クラスター状態を生成しています。特に、これまで実装されたクラスター状態よりも効率的に計算リソースとして使用可能な構造のクラスター状態を生成しました。

これまでの実験準備研究により、実験室環境を大幅に改善・安定化することに成功したため、 freespace系を構築できるようになりました。これは実験室環境の温度安定性が高まったため freespace系でも長期的安定性が見込めるようになったためです。さらに freespace系の方がモジュールを光ファイバーで連結していく方法

よりも低損失であります。以上のことから、より質の高いクラスター状態の生成が見込めるようになりました。

今年度は実際に下図通りの実験系を構築し、クラスター状態の相関を測定することができました。

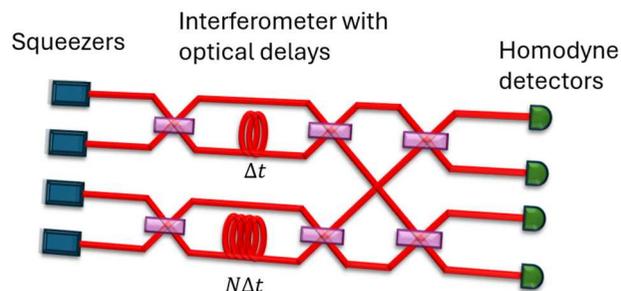


図1 freespace系で組んだ光量子コンピュータ

測定型量子計算では、扱える測定の種類と精度が扱える量子操作の種類と精度に対応しています。ホモダイン測定では決定論的に光電場の加減算・定数倍操作のみが可能です。任意の量子計算が可能な光量子コンピュータでは光電場同士の「掛け算」操作を行う必要があり、決定論的な非線形操作に相当する非線形測定が必要不可欠です。最も基礎的な非線形測定を実現するための手法は、図2のように被測定光と補助的な量子光を干渉させ、得られる二つの光の片方にホモダイン測定をし、他方にはその測定結果に非線形計算を行った値に基づき動的に位相回転操作をする、というフィードフォワードの後にホモダイン測定をするものです。フィードフォワード中の測定結果に対する非線形計算を、ルックアップテーブルと呼ばれる計算表を用いて行います。ルックアップテーブルは、プログラマブルなデジタル回路内のメモリブロックを使用して実装されてお

り、事前に入出力の組を書き込んであるので、実際には非線形計算をすることなく、高速化がはかられます。現在100倍程度の高速化を得ています。この柔軟かつ高速な非線形計算により、光学系との同期が容易となったことで、非線形測定が実験的に可能になりました。さらに高速な量子計算のためのFPGAの開発のため環境準備を行いました。

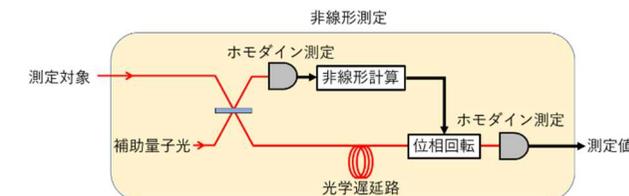


図2 非線形測定のセットアップ

3. 今後の展開

さらなる高速化を見込み、クラウド公開運用の準備をしています。新たな課題推進者5と協力して、パブリッククラウドで動作させることを念頭に設計を進めています。実機の予定仕様と照らし合わせ、Quad-rail Lattice方式の光量子コンピュータを想定しましてソフトウェア仕様を検討しています。