

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「新たな光機能や光物性の発現・利活用
を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術」
研究課題「極限コヒーレント光通信のための量子力
学的操作と超伝導光子数識別器および光集積シス
テム化法の研究」

研究終了報告書

研究期間 2015年 12月～2021年 3月

研究代表者： 古澤 明
(東京大学大学院工学系研究科、教
授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本プロジェクトは極限コヒーレント光通信実現を目指し、そのための量子力学的操作と超伝導光子数識別器およびそれらの光集積システム化法を研究するものである。

極限コヒーレント光通信のための量子力学的操作のうち、最も重要なものは3次位相ゲートである。古澤グループは、2015年度にその簡便な実現方法を発明し、それを実現すべく、2016年度にはその入力段における光波束の実時間振幅測定法を考案し、それをを用いて単一光子状態波束の実時間振幅測定に世界で初めて成功した。さらに、2016年度には3次位相ゲートにおける非線形フィードフォワードのための低レイテンシーAD-FPGA-DAボード(アナログ-デジタル変換・フィールドプログラマブルゲートアレイ・デジタル-アナログ変換ボード)の仕様をまとめ発注し、2017年度には納品された低レイテンシーAD-FPGA-DAボードの検収を行った。そして、このAD-FPGA-DAボードを用いて3次位相ゲートの主要部であるダイナミックスキューニングゲートの動作実験を行いそれに成功した。2018年度はこれらの成功を受け、3次位相ゲートを構築するための最後のパーツである、安定した光学遅延系を構築すべく、エリオットセルを開発した。また、2017年度末から2018年度にかけて、3次位相ゲート実現法の単純な拡張により4次位相ゲートが実現できることを見だし、4次位相ゲートの簡便な実現方法を発明した。これにより、3次位相ゲート開発は4次位相ゲート開発と等価になり、開発を加速することに成功した。2019年度はこれらを受けて、3次位相ゲート全体の動作検証実験を行った。特に、核となる非線形フィードフォワードの部分を、これまでに開発した低レイテンシーAD-FPGA-DAボードおよびエリオットセルを組み合わせ実現に成功した。これにより、3次位相ゲートの主要部分の開発が完了した。そして最終年度である2020年度は、これまでの研究の総まとめとして、これまでの研究成果の全てを統合し、3次位相ゲート実現に成功した。同じ手法は4次位相ゲートにも用いることができるため、4次位相ゲート実現にも目途を付けたことになる。さらに理論研究の結果、3次位相ゲートのみでも極限コヒーレント光通信のためのための「量子ノイズイート光アンプ」を実現できることを明らかにした。

4次位相ゲート実現には補助状態が必要になるが、その補助状態を生成すべく、青木グループは共振器 QED 系を立ち上げ、その成果として2018年度にナノファイバー共振器を用いた結合共振器 QED 系の構築に成功し、2019年度には補助状態には必須のスキューズの観測に大きく近づき2020年度に観測に成功した。

極限コヒーレント光通信に必須の超伝導光子数識別器もグループ間で仕様を検討し、高橋グループがその要素技術の開発を行った。最終的に、通信波長帯で量子効率92.7%、40光子程度まで測定可能な光子数識別器技術を確立し、通信波長帯において単一光子から4光子までの光子数識別がなされていることを実証することができた。

光集積システム化法については、古澤グループが2015年度に量子テレポーテーションの主要部を光導波路回路化し実験を行い、2016年度にはその結果に基づいて光導波路回路の再設計を行った。2017年度には新光導波路回路の評価実験を行った。その結果、基本レーザーの波長をこれまで量子光学で通常用いられてきた860nmから通信波長帯の1.5ミクロン帯に移す必要があると判明した。そのため2018年度は通信波長帯での量子光学実験系を立ち上げ、6.2dBのスキューズ光の生成に成功した。2019年度は引き続きこれの高性能化を図り、2THzの広帯域化に成功した(2THzの広帯域でスキューズ光の測定に成功した)。そして最終年度の2020年度は、これまでの総まとめとして、量子ゲートテレポーテーションであるユニバーサルスキューザー光導波回路を作製し、1.5ミクロン帯での動作に成功した。

以上のように、極限コヒーレント光通信実現のための量子力学的操作と超伝導光子数識別器およびそれらの光集積システム化法の開発に成功した。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 単一光子状態の振幅実時間測定に成功

概要:世界で初めて単一光子状態の振幅実時間測定に成功した(H. Ogawa et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 233602 (2016))。極限コヒーレント光通信実現における最重要課題は、3 次位相ゲートの実現である。そのための補助入力である3 次位相状態を、3 次位相ゲートのセットアップに損失なく導入するためには、非古典状態波束振幅の実時間測定が必須であり、本研究ではそれを世界で初めて実現した。

2. 4 次位相ゲートを含む n 次位相ゲートを最小のリソースで実現する方法を提案

概要:極限コヒーレント光通信のために必須の 4 次位相ゲートを含む n 次位相ゲートを最小のリソースで実現する方法を發明した(P. Marek et al., Phys. Rev. A **97**, 022329 (2018))。この發明により、極限コヒーレント光通信だけでなく、ユニバーサル量子コンピューター実現に大きく近づいた。

3. 全光学式量子メモリーの実現

概要:世界で初めて位相情報を保存できる全光学式量子メモリーを実現した(Y. Hashimoto et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 113603 (2019))。これまでの量子メモリーは単一光子状態など、位相情報を持たない状態を保存するものであったが、本論文では世界で初めて位相情報を保存できる全光学式量子メモリーを実現した。全光学式なので、原子等を用いた量子メモリーとは異なり、任意の波長で動作可能である。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 3 次位相ゲートの簡便な実現法を發明

概要:極限コヒーレント光通信実現のために必須の 3 次位相ゲートの簡便な実現法を發明した(K. Miyata et al., Phys. Rev. A **93**, 022301 (2016))。これまで 3 次位相ゲートは、多数の量子ゲートを組み合わせて実現するものと考えられていた。しかし本論文では、3 次位相ゲートに必要な光の非線形光学効果と、電気の非線形回路と光の補助状態を組み合わせるだけで実現できることを示した。この結果、3 次位相ゲート実現の可能性を飛躍的に高めた。

2. ユニバーサル大規模量子計算を実現する方法を發明

概要:1 つの量子テレポーテーション装置の時間領域多重により、ユニバーサル大規模量子計算を実現する方法を發明した(S. Takeda and A. Furusawa, Phys. Rev. Lett. **119**, 120504 (2017))。本研究では量子テレポーテーション装置の導波路回路化を行っているが、それが1 つあるだけで時間領域多重することにより、極限コヒーレント光通信ばかりでなく、大規模量子コンピューター実現にも繋がる非常に大きな成果であった。

3. 2.5THz という超広帯域で 6dB のスクイーズド光の生成に成功

概要:世界で初めて 2.5THz という超広帯域で 6dB のスクイーズド光の生成に成功した(T. Kashiwazaki et al., APL Photonics **5**, 036104 (2020))。広帯域のスクイーズド光は、極限コヒーレント光通信だけでなく、量子暗号、量子イメージング、光量子コンピューターにとって基本的なリソースであるため、その高性能化は極めて社会的にインパクトがある。

< 代表的な論文 >

1. Kazunori Miyata, Hisashi Ogawa, Petr Marek, Radim Filip, Hidehiro Yonezawa, Jun-ichi Yoshikawa, and Akira Furusawa, “Implementation of a quantum cubic gate by an adaptive non-Gaussian measurement,” Phys. Rev. A **93**, 022301 (2016)

概要:極限コヒーレント光通信実現のために必須の 3 次位相ゲートの簡便な実現法を發明した。これまで 3 次位相ゲートは、多数の量子ゲートを組み合わせて実現するものと考えられていた。しかし本論文では、3 次位相ゲートに必要な光の非線形光学効果と、電気の非線形回路と光の補助状態を組み合わせるだけで実現できることを示した。この結果、3 次位相ゲート実現の可能性を飛躍的に高めた。

2. Hisashi Ogawa, Hideaki Ohdan, Kazunori Miyata, Masahiro Taguchi, Kenzo Makino, Hidehiro Yonezawa, Jun-ichi Yoshikawa, and Akira Furusawa, “Real-Time Quadrature Measurement of a Single-Photon Wave Packet with Continuous Temporal-Mode Matching,” Phys. Rev. Lett. 116, 233602 (2016)

概要: 世界で初めて単一光子状態の振幅実時間測定に成功した。極限コヒーレント光通信実現における最重要課題は、3 次位相ゲートの実現である。そのための補助入力である 3 次位相状態を、3 次位相ゲートのセットアップに損失なく導入するためには、非古典状態波束振幅の実時間測定が必須であり、本研究ではそれを世界で初めて実現した。

3. Shuntaro Takeda and Akira Furusawa, “Universal Quantum Computing with Measurement-Induced Continuous-Variable Gate Sequence in a Loop-Based Architecture,” Phys. Rev. Lett. 119, 120504 (2017)

概要: 1 つの量子テレポーテーション装置の時間領域多重により、ユニバーサル大規模量子計算を実現する方法を発明した。本研究では量子テレポーテーション装置の導波路回路化を行っているが、それが1つあるだけで時間領域多重することにより、極限コヒーレント光通信ばかりでなく、大規模量子コンピューター実現にも繋がる非常に大きな成果であった。

§2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「古澤」グループ

研究代表者: 古澤 明 (東京大学工学系研究科 教授)

研究項目

- ・極限コヒーレント光通信に必須の 3 次位相ゲートおよび 4 次位相ゲートを、自由空間光学系を用いた量子ゲートテレポーテーションにより実現を目指す。
- ・NTT と共同して、量子ゲートテレポーテーション装置の光集積システム化のための技術開発を行う。

② 「青木」グループ

主たる共同研究者: 青木 隆朗 (早稲田大学理工学術院 教授)

研究項目

- ・微小光共振器を用いた共振器 QED 系を構築し、4 次位相ゲート の補助状態を生成する。

③ 「高橋」グループ

主たる共同研究者: 高橋 浩之 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

研究項目

- ・古澤グループと協働してスペックを詰めながら、超伝導体を用いて、高い量子効率と応答速度を併せ持つ超伝導光子数識別器を開発する。

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

独マインツ大学の P. van Loock 教授には、ほぼ毎年東大の古澤研究室に滞在してもらい、「量子ノイズイート光アンプ」に関する共同研究を実施した。