

令和 2 年 4 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14143

研究課題名（和文）光のノイズフリーな高周波サイドバンド帯における連続量量子情報処理

研究課題名（英文）Continuous-variable quantum information processing in noise-free high-frequency optical sidebands

研究代表者

武田 俊太郎（Takeda, Shuntaro）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：80737304

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：光の量子力学的な性質を利用すると、特定の計算を現代のコンピュータよりも高速に実行できる量子コンピュータや、現代の通信技術の限界を超える大容量通信が実現できる。光の振幅や位相などの連続的な値を用いた量子情報処理では、これまで技術的制約からレーザーのノイズの乗りやすい周波数で行われていたため、情報処理精度が制限されてきた。本研究では、高周波サイドバンド帯と呼ばれるノイズのない周波数に光の量子的な状態を生成・操作・検出するための基本的な技術開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、光の連続的な値を用いた量子情報処理は、ノイズの影響を受けやすく、何ステップも情報を処理するとノイズが蓄積するため、大規模な情報処理は困難であった。本研究成果では、ノイズの影響を受けにくい環境下で情報処理を行う基本技術が確立され、これによって従来よりも高精度な量子情報処理の実現可能性が開かれた。将来的には、より大規模な量子情報処理が展開できるようになり、量子コンピュータや大容量通信といった光量子情報処理の実用化へとつながる。

研究成果の概要（英文）：Quantum properties of light enable quantum computation and high capacity optical communication. Quantum information processing with continuous amplitude and phase of light has been performed in noisy frequencies due to technical limitations, which limits the accuracy of information processing. In this project, we developed basic technologies to generate, manipulate, and detect non-classical optical quantum states in noiseless high frequency sidebands.

研究分野：量子光学

キーワード：量子光学 量子情報 連続量量子情報処理 スクイーズド光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光の量子力学的な性質を利用すると、現代のコンピュータよりもはるかに計算能力の高い量子コンピュータや、現代の通信技術の限界を超える大容量通信が実現できる。このような光の量子情報処理には2種類の手法がある。1つは光子を用いて0・1を重ね合わせた量子ビットを表現するデジタル的な手法であり、もう1つは光の振幅と位相を用いて連続値の重ね合わせ情報(連続量)を表現するアナログ的な手法である。後者の連続量の手法は、光の振幅・位相を変調器で容易に操作できる上、それをホモダイン測定により高効率で読み出せるため、量子ビットよりも圧倒的に高効率な情報処理が可能となる。研究代表者はこれまで、連続量の手法で高効率に非古典光の生成・操作を行う技術開発に取り組んできた。

従来の連続量量子情報処理は、レーザーキャリア周波数近傍の低周波帯(10MHz以下)に量子情報を乗せざるを得なかった。これは、この範囲の外にある高周波帯では光の操作や測定に用いるエレクトロニクスが応答できないためである。しかし、この低周波帯は光源であるレーザーのノイズを含むと同時に、光の信号をホモダイン測定で読み出した後に低周波の電気ノイズを受けやすい。このため、これまでの連続量量子情報処理は常にこれらのノイズによって情報が乱され、情報処理精度が制限されてきた。

ノイズの多い低周波帯を避けるのは、現代のアナログ情報処理では常識である。例えばラジオの送受信では、周波数が数MHzの電波が情報のキャリアであるが、送りたい情報そのものはキャリアを数kHzの交流信号で変調することによってキャリア周波数から離れたサイドバンド帯に乗せる。これにより、雑音に強く信頼性の高い伝送が実現する上、複数のサイドバンド周波数に独立に情報を乗せることで大量の情報を同時に伝送できる。同様に、光の連続量量子情報処理も低周波帯ではなくサイドバンド帯で実現できれば、高効率な量子情報処理が、雑音のない理想的な環境でロバストに実現できる上、多数のサイドバンド帯に情報を乗せることが可能となり、大規模量子コンピューティング・量子通信への道が開ける。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究では光のノイズのない理想的なサイドバンド周波数帯を用いた高効率な連続量量子情報処理の基盤技術を実現し、将来的に従来の十倍以上の大規模な量子情報処理へとつなげることを目的とする。特に、本研究ではキャリア周波数 $\pm 500\text{MHz}$ 程度の高周波サイドバンド帯を理想的な情報処理のターゲットに定め、この周波数帯に特化した新しいテクノロジーを開発する。これにより、この周波数帯において量子情報処理の必須要素である非古典状態の生成・操作・検出を実現することを目指す。この結果、エレクトロニクスの制約に縛られてノイズの多い低周波帯で行わざるを得なかった従来の量子情報処理から脱却し、今後はノイズに乱されない高精度な量子情報処理が実現できる。先行研究では、複数のサイドバンド帯を利用した60モード量子もつれ状態の生成が報告されている。この量子もつれ状態と本研究の開発技術を組み合わせると、大規模かつユニバーサルな量子情報処理が展開でき、実用レベルの量子情報処理の実装へと直結する。

3. 研究の方法

本研究では500MHzの高周波サイドバンド帯をターゲットとして、まず様々な量子情報処理に必要な光の非古典状態(非ガウス型状態)の生成・検出を目指す。次に、その状態に量子操作の一例としてスクイーズ操作(特定の位相の量子揺らぎを圧搾する変換)を行う。これら一連の生成・操作・検出のプロセスが実現すれば、今後は全ての量子情報処理をこの理想的な周波数帯に移行できることを示したことになる。

非古典状態は、スクイーズド光(量子揺らぎが減少した光)から「光子引き去り」という手法を用いて生成できる。従来の低周波帯の量子情報処理では、非線形光学効果を増強する共振器(光パラメトリック発振器)を用いてキャリア周波数の共振ピークに生成したスクイーズド光が利用された。しかし、今回はその共振ピークの両隣のピークに生成されるサイドバンド帯のスクイーズド光を利用して非古典状態の生成を行うことで、高周波サイドバンド帯の非古典状態を生成する(図1)。また、高周波帯の非古典状態を測定するため、低周波帯の感度を犠牲にし、高周波帯で共振させて感度を高めた測定器を開発する。さらに、非古典状態に対するスクイーズ操作を行うため、実装上有利な測定型のスクイーズ操作と呼ばれる手法を採用し、そのための実験システムを開発する。

4. 研究成果

1年目は、非古典状態の生成および検出技術の開発に取り組んだ。まず、500MHzの高周波サイドバンド帯に生成したスクイーズド光を利用することで、高周波サイドバンド帯に「シュレディンガーの猫状態」と呼ばれる非古典状態を生成することに成功した。また、500MHzで十分な感度を持つ光検出器を開発し、生成した非古典状態の光を検出した。この検出結果から、生成したシュレディンガーの猫状態を評価した結果、強い非古典性を持つことが示された。これは、高周波帯において高い純度を持つ非古典状態を生成・検出できたことを意味する。以上の結果を論文にまとめて発表した(Physical Review Letters 121, 143602 (2018))。

2年目は、1年目に生成した非古典状態の光に測定型スクイーズ操作を実現することを目指し、そのための実験システムの開発に取り組んだ。測定型スクイーズ操作が正しく動作するために

は、電気信号ラインの信号伝達タイミングおよび増幅率を適切に調整する必要があった。開発したシステムにおいてこの調整を行い、測定型スクイーズ操作を行うのに十分な精度で調整ができていたことが確認できた。これにより、測定型スクイーズ操作を実際に行うための実験システムがおおむね完成したといえる。

今後は、実際にこれらの技術を組み合わせて高周波サイドバンド帯での非古典状態の光の生成・操作・検出を組み合わせた実験を進め、高周波サイドバンド帯での量子情報処理の可能性を追求していく予定である。

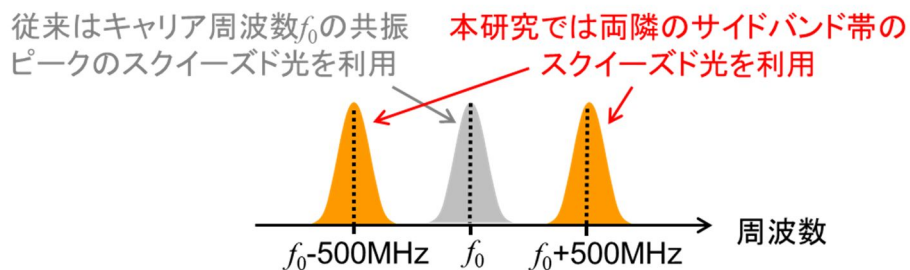


図1：共振器から発生するスクイーズド光の周波数特性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Serikawa Takahiro, Yoshikawa Jun-ichi, Takeda Shuntaro, Yonezawa Hidehiro, Ralph Timothy C., Huntington Elanor H., Furusawa Akira	4. 巻 121
2. 論文標題 Generation of a Cat State in an Optical Sideband	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 143602
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.121.143602	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shuntaro Takeda, Akira Furusawa	4. 巻 4
2. 論文標題 Toward large-scale fault-tolerant universal photonic quantum computing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 60902
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5100160	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shuntaro Takeda
2. 発表標題 Toward practical photonic quantum computing
3. 学会等名 4th International Symposium on Research and Education of Computational Science（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----