

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13385

研究課題名(和文)周波数コムのモード間量子相関制御による大規模クラスタ状態の生成

研究課題名(英文)Generation of massive cluster states by quantum correlation control among frequency modes of frequency comb

研究代表者

神成 文彦(Kannari, Fumihiko)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：40204804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：超短パルスレーザーが光ファイバを伝播する際の主として4波混合過程を利用して、ファイバ射出後の広帯域スペクトルの周波数モード間に量子論的相関が発生可能である。

まず、広帯域スペクトルを固有値分解解析し、直交固有関数(シュミットモード)を抽出するためのマルチ周波数モード間量子相関解析理論を新たに構築した。その結果、ゼロ分散波長でのファイバ伝播においては、高次の周波数モードまでの高いスクイーミングが得られることを明らかにした。

さらに、ファイバ入射パルスのスペクトル位相を最適化制御することにより、4つのスペクトル帯それぞれをモードとしたあらゆる形状の4モードクラスタ状態が達成できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：When utilizing ultrafast nonlinear optics such as four-wave mixing in a fiber, we can generate quantum correlation among frequency modes of a laser pulse propagating through the fiber.

First, we constructed a multimode quantum theory of nonlinear propagation in optical fibers, where we can extract orthogonal eigenfunctions from a broad spectrum. Using this theory, we proved that higher photon-number density squeezing can be obtained up to much higher eigenmodes via nonlinear pulse propagation.

Furthermore, we demonstrated that four-mode cluster states in any combinations can be generated among the frequency modes in a laser pulse propagating through a fiber when the initial spectral phase are adaptively shaped.

研究分野：超高速レーザー光学および量子光学

キーワード：量子光学 スクイーズド光 広帯域光 周波域量子相関 適応制御

### 1. 研究開始当初の背景

測定型量子計算は、回路モデルの量子計算に取って代わるモデルとして注目を集めている。この測定ベースの量子コンピュータでは、多モードにもつれ合った量子状態であるクラスター状態が計算資源となる。特に大規模に量子もつれが実現可能という観点では、デコヒーレンスが起きにくい連続変数の量子光学は大きな可能性を秘めている。これまでに光パラメトリック発振器を用いた手法等、さまざまなアプローチがとられてきているが、光ファイバの三次の非線形効果を用いたスキームにおけるクラスター状態の生成は議論されてこなかった。

### 2. 研究の目的

そこで本研究の目的は、光ファイバベースのクラスター状態生成の手法を提案し、その検討を行うことである。量子もつれを最適化できる光ファイバへの入射レーザ波形を理論的に特定することは非常に困難であるため、入射パルスに対して波形整形器と最適化アルゴリズムを組み合わせた適応制御手法を用いる。エンタングルさせたい任意の独立した  $N$  個の周波数帯を決め、ファイバ入射パルスの周波数位相を最適化制御することによって、周波数モード間クラスター状態生成の数値解析を行った。光源には石英ファイバの異常分散領域にあたる 1550 nm 波長帯のフェムト秒レーザ、および高非線形偏波保持フォトニック結晶ファイバのゼロ分散領域付近に中心波長をもつチタンドープサファイアレーザを想定した。そして異常分散領域とゼロ分散領域それぞれにおいて  $N=4$  モードクラスター状態の数値解析を行った。

### 3. 研究の方法

#### (1) 数値解析手法

ファイバ伝搬の数値解析には非線形シュレーディンガー方程式は(1)式であり、スクイジングの量を算出するにあたり backpropagation 法 [1]を用いた。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z} A(z, t) \\ &= i \sum_{k \geq 1} \frac{i^k \beta_k}{k!} \frac{\partial^k}{\partial t^k} A(z, t) \\ &+ i\gamma |A(z, t)|^2 A(z, t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $A(z, t)$  光パルスの複素振幅、 $\beta_k$  は  $k$  次の分散、 $\gamma$  は非線形係数である。まず、1550 nm 波長帯のパルスの解析条件を示す。最適制御の初期値としてピークパワーは 2000 W、パルス幅は 125 fs(FWHM)のレーザパルスを仮定した。光ファイバの分散は一般的な石英ファイバを仮定し、非線形係数  $\gamma=2$  /Wkm、分散パラメータ  $\beta_2=-20$  ps<sup>2</sup>/km とし、これより高次の分散パラメータは簡単のため無視している。ファイバ長は 39 cm(1 ソリトン周期)とした。次に、ゼロ分散領域における伝搬の解析条件を示す。適制御の初期値としてパルスのピー

クパワーは 66 W とし、パルス幅は 90 fs(FWHM)、中心波長 753 nm を仮定している。用いたフォトニッククリスタルファイバ (NL-PM-750)の非線形係数は、 $\gamma=95$  /Wkm あり、ゼロ分散波長  $\lambda_0=753$  nm で、分散パラメータは、

$$\beta_3=6.38 \times 10^{-2} \text{ ps}^3/\text{km}$$

$$\beta_4=-2.90 \times 10^{-5} \text{ ps}^4/\text{km}$$

$$\beta_5=-1.42 \times 10^{-5} \text{ ps}^5/\text{km}$$

である。ファイバ長は 60 cm した。

また今回ターゲットとしたのは 4 モードクラスター状態で、直線・四角・T型の三つのパターン、さらに各スペクトル帯の配置を考えると全部で 19 種類となる。

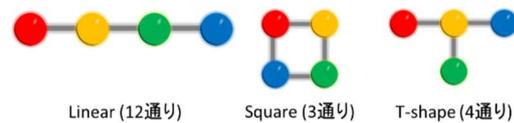


図1 4モードクラスター状態。それぞれの丸は量子状態を示し、直線はモード間で量子もつれ状態であることを示す。

各モードが十分なもつれ状態になっているかを評価する指標が以下の式である。

$$\delta_i = \hat{p}_i - \sum_j V_{ij} \cdot \hat{x}_i \quad (2)$$

隣接行列  $V$  によりクラスター状態の形状は一意に決まり、 $V$  は 0 または 1 の成分のみを持つすべての  $i$  に対して  $\delta_i < \delta_{\text{shot}}$  とショットノイズレベルを下回れば、そのクラスター状態が生成されているといえる。

続いて、想定した実験セットアップ図を図2に示す。

レーザ装置から出射されるフェムト秒パルスは、まずビームスプリッタによって信号光と LO に分けられる。信号光はファイバ入射前に波形整形器によって位相変調を受け、ファイバ干渉計により真空スクイズド光を生成する。LO は狙っている量子もつれを測定するために一意的にスペクトル振幅・位相整形され、ホモダイン測定によってノイズレベルを測定する。得られたデータは焼きなまし法に基づく最適化アルゴリズムにより入力側の SLM にフィードバックされ、高度にもつれ合った量子状態が得られるように SLM の位相変調マスクは更新されていく。

焼きなまし法に用いた各種パラメータは以下の通りである。

- ・位相マスクのピクセル数は 128 とし、パルスの大部分のスペクトル成分がこの変調器内に入射されるようにしている。
- ・コスト関数は次式を用いた。

$$C = 10 \log \{ (\Delta \delta_1^2 + \Delta \delta_2^2 + \Delta \delta_3^2 + \Delta \delta_4^2) / 4 \} \text{ (dB)}$$

このコスト関数の改善が見られなくなるところで、繰り返し計算を終了している。

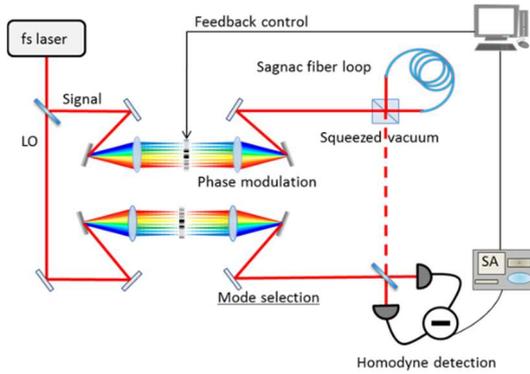


図2 量子もつれ状態を最適制御するための実験セットアップ。

- ・各試行におけるピクセルの位相変調度分解能は  $2\pi/32$  とした。この値よりも細かい変調度にしてもコスト関数の改善は見られなかった。
- ・初期設定温度  $T_0$  は  $1 \sim 0.1$  とし、温度低下係数は  $\eta = 0.9996 \sim 0.9998$  とした。最適化計算終了後にどの程度の割合でコスト関数は改善されているか、もしくはどの程度の割合で改悪の遷移を受け入れているかを確認することで、初期温度と温度低下係数の妥当性を確認した。

#### 4. 研究成果

- (1) 異常分散領域の数値計算結果  
 まず全パターンに用いたターゲット(LO)を図3に示す。各周波数帯のスペクトル幅は1.8 THzである。

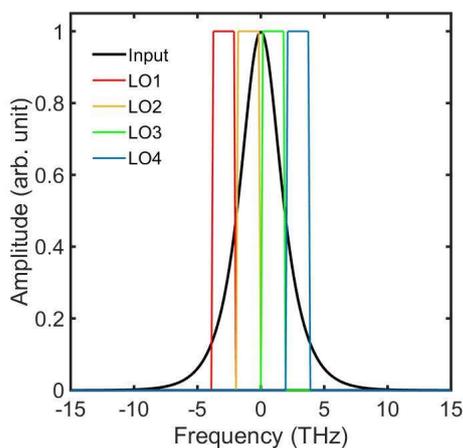


図3 想定した4つの周波数帯。

以下 Table 1 に最適化前と最適化後の全データを示す。ただし、便宜的にもつれ合い状態にさせたいスペクトル帯を長波長側から順に 1, 2, 3, 4 としている。全パターンにおいてノイズレベルの平均および各モードに対するノイズレベル  $\delta_i$  はショットノイズを下回っており、全パターンでクラスター状態の生成に成功しているといえる。

Table 1 異常分散ファイバを用いた際の4モードクラスタ状態生成のための適応制御の結果

異常分散領域	最適化前 (dB)	最適化後 (dB)	
Linear	①-②-③-④	0.04	-1.21
	①-②-④-③	0.33	-0.92
	①-③-②-④	-1.75	-1.89
	①-③-④-②	-0.47	-1.38
	①-④-②-③	-0.82	-1.67
	①-④-③-②	-0.15	-1.49
	②-①-③-④	0.33	-1.05
	②-①-④-③	0.58	-0.67
	②-③-①-④	-0.82	-1.65
	②-④-①-③	-0.90	-1.47
	③-①-②-④	-0.48	-1.41
	③-②-①-④	-0.16	-1.49
Square	①-②-③-④	-0.81	-1.74
	①-②-④-③	-0.73	-1.59
	①-③-④-②	-2.43	<b>-2.52</b>
T-shape	②-①-③-④	-0.07	-1.45
	①-②-③-④	0.05	-1.05
	①-③-②-④	0.06	-1.05
	①-④-②-③	-0.02	-1.45

最大 -2.52 dB のもつれ度合いのクラスター状態が Square の 1-4-2-3 の順にノードを形成しているものについて得られた。次に最適化前後で最もノイズレベルが改善された T-shape で中心が 4 となっている場合について、その繰り返し計算結果と最適古典スペクトルをそれぞれ図4, 5に示す。

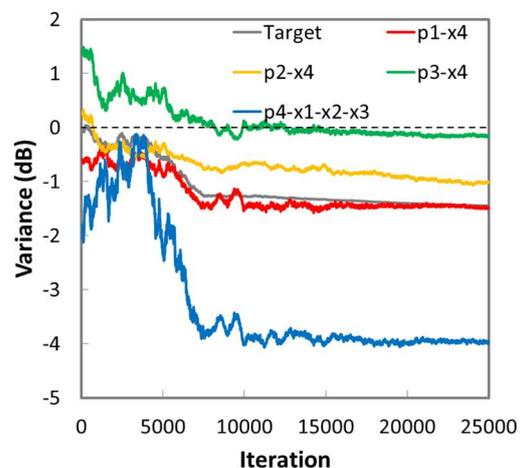


図4 焼き鈍し法を用いた適応制御における収束の様子

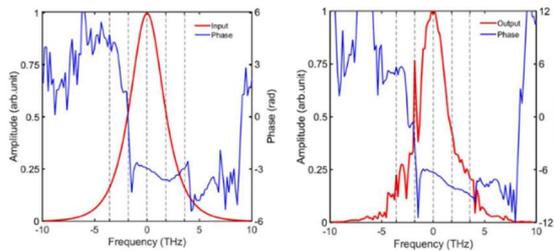


図5 適応制御されたファイバ入射パルス（左）とファイバ出射パルス（右）の位相及び振幅スペクトル。

全体的にソリトンの伝搬の場合、ゼロ分散領域における伝搬と比べて、最適化前ではショットノイズレベル付近の値が得られているものの、最適化によって改善される度合いが小さいことがわかった。

(2) ゼロ分散領域の数値計算結果  
全パターンに用いたターゲット(LO)を図6に示す。各周波数帯のスペクトル幅は4.7THzであり、各モードは異常分散領域のものとは比べて広帯域となっている。

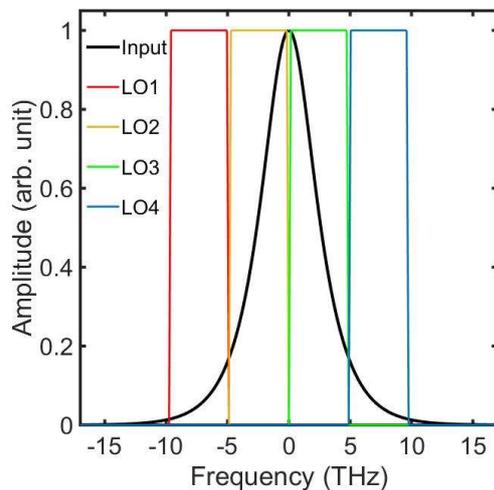


図6 想定した4つの周波数帯。

Table 2 に最適化前と最適化後の全データを示す。

最もノイズレベルが最小のもので  $-3.08$  dB が得られた。その形状が Linear の 1-4-2-3 と並んだものになったのは定性的に次のように理解できる。ファイバ伝搬過程では、中心波長を中心に長波長側と短波長側に強いエンタングルメントが形成されており、Linear クラスター状態のうち、Linear の 1-4-2-3, 2-3-1-4 以外では長波長側同士または短波長側同士での相関が強く得られている必要がある。つまりファイバ伝搬により中心波長を中心にサイドバンドに大きな量子相関を形成しており、1 と 4, 2 と 3 のもつれ合いの制御が比較的容易であるからである。

Table 2 ゼロ分散ファイバを用いた際の4モードクラスター状態生成のための適応制御の結果

ゼロ分散領域		最適化前 (dB)	最適化後 (dB)
Linear	①-②-③-④	2.38	-0.69
	①-②-④-③	2.53	-1.17
	①-③-②-④	0.99	-1.19
	①-③-④-②	1.29	-1.44
	①-④-②-③	-0.34	<b>-3.08</b>
	①-④-③-②	0.10	-2.90
	②-①-③-④	3.25	-1.20
	②-①-④-③	2.35	-0.53
	②-③-①-④	0.91	-3.06
	②-④-①-③	0.50	-1.40
	③-①-②-④	2.37	-1.16
	③-②-①-④	1.57	-2.95
Square	①-② ④-③	0.63	-2.30
	①-② ③-④	2.24	-2.48
	①-③ ④-②	-0.60	-2.31
T-shape	②-①-③ ④	3.08	-1.38
	①-②-③ ④	1.49	-1.20
	①-③-② ④	1.60	-1.15
	①-④-② ③	0.49	-1.29

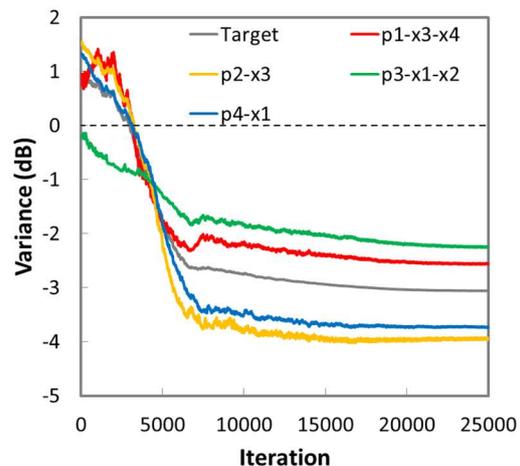


図7 焼き鈍し法を用いた適応制御における収束の様子

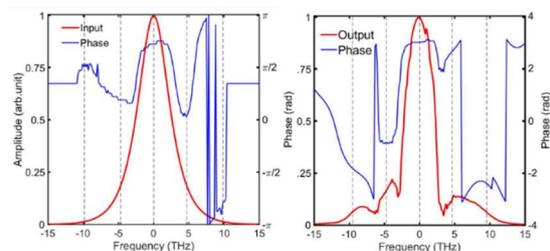


図8 適応制御されたファイバ入射パルス（左）とファイバ出射パルス（右）の位相及び振幅スペクトル。

異常分散領域のときと同様、最ももつれ度合が改善された Linear2-3-1-4 について、繰り返し計算結果、古典スペクトルをそれぞれ図 7, 8 に示す。

本研究では、ファイバ入射パルスの最適化制御によるクラスター状態生成の検討を行った。その結果、ファイバ入射パルスのスペクトル位相を変化させることにより、四つのスペクトル帯それぞれをモードとしたあらゆる形状の 4 モードクラスター状態が達成されることが示された。

また、波形整形器内の SLM において、パルスに加える位相変調量を変化させることで、所望のクラスター状態が得られるという点で、このシステムは高い拡張性をもつといえる。さらに 4 者間以上にもつれ合ったクラスター状態生成への応用が期待される。

#### <引用文献>

- [1] Y. Lai and S. S. Yu, "General quantum theory of nonlinear optical-pulse propagation," Phys. Rev. A **51**, 817 (1995).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Aruto Hosaka, Taiki Kawamori, Fumihiko Kannari, "Multimode quantum theory of nonlinear propagation in optical fibers," Phys. Rev. A **94**, 査読有り、058336-1-6 (2016)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.94.05833
- ② Aruto Hosaka, Kenichi Hirose, Ryota Sawada, Fumihiko Kannari, "Generation of photon-number squeezed states with a fiber-optic symmetric interferometer," Optics Express **23**, 査読有り、18850-18863 (2015)  
DOI: 10.1364/OE.23.018850

[学会発表] (計 8 件)

- ① 富田雅也、保坂有杜、神成文彦、"広帯域局所発振光を用いた真空スクイーズド光パルスの測定," 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜 (神奈川県、横浜市) 2017 年 3 月 14 日~3 月 17 日
- ② 保坂有杜、富田雅也、大塚翼、神成文彦、"スーパーコンティニューム光の周波数モード光子数相関解析," 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜 (神奈川県、横浜市) 2017 年 3 月 14 日~3 月 17 日
- ③ Aruto Hosaka, Taiki Kawamori, Fumihiko Kannari, "Mode analysis of quantum nonlinear propagation of ultrashort laser pulse in an optical fiber," Nonlinear Photonics 2016, Photonics and Fiber Technology, Sydney (Australia), 2016 年 9 月 4 日~9 月 8 日
- ④ Aruto Hosaka, Taiki Kawamori, Fumihiko Kannari, "Parallel generation of squeezed states with Kerr effect of an optical fiber," CLEO, Applications and Technology, San

Jose (USA), 2016 年 6 月 5 日~6 月 10 日

- ⑤ 川森泰貴、保坂有杜、神成文彦、"ファイバ入射パルスの最適化制御による周波数モード間直交持つ状態生成," 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学 (東京都目黒区大岡山) 2016 年 3 月 19 日~3 月 24 日
- ⑥ 保坂有杜、川森泰貴、神成文彦、"フォトリック結晶ファイバを用いたスクイーズド状態の大規模並行生成に関する数値解析," 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学 (東京都目黒区大岡山) 2016 年 3 月 19 日~3 月 24 日
- ⑦ Aruto Hosaka, Kenichi Hirose, Ryota Sawai, Fumihiko Kannari, "Photon-number squeezed pulse generation with symmetric Mach-Zehnder interferometer," CLEO Europe 2015m Busan (Korea), 2015 年 6 月 21 日~6 月 25 日
- ⑧ Aruto Hosaka, Kenichi Hirose, Ryota Sawai, Fumihiko Kannari, "Photon number squeezing pulse generation with a symmetric fiber interferometer," The 4<sup>th</sup> Advanced Lasers and Photon Sources, パシフィコ横浜 (神奈川県、横浜市) 2015 年 4 月 22 日~4 月 23 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.kami.elec.keio.ac.jp/report.html>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

神成文彦 (KANNARI Fumihiko)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号: 40204804