

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現

PM名：山本 喜久

プロジェクト名：量子人工脳

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成28年度

研究開発課題名：

大規模時分割多重光パラメトリック発振器に基づく

コヒーレントイジングマシン

研究開発機関名：

日本電信電話株式会社

研究開発責任者

武居 弘樹

# I 当該年度における計画と成果

## 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

平成28年度は以下を課題として挙げていた。

課題1：時分割多重 OPO のさらなる大規模化

課題2：コヒーレント位相測定、フィードバック光注入系の安定化

課題3：コヒーレントイジングマシンのベンチマーキングと応用検討

課題4：時分割多重 OPO のためのフォトニックデバイスの構築

## 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

### 2-1 進捗状況

課題1：光ファイバ共振器長をこれまでの1 km から21 km まで長延化し、ポンプ光を10 GHz 繰り返しとすることで、100 万を超える時分割多重 OPO を発生した。また、発生した OPO 群の2値化した位相を閾値処理することにより生成した2値データが、NIST の乱数検定に合格する品質の高い乱数となっていることを確認した。

課題2：コヒーレント位相測定の局部発振光の位相の安定化に成功した。

課題3：2000 の OPO を測定・フィードバックにより結合したコヒーレントイジングマシンを実現した。構築したマシンを用いて NP 困難問題の一つであるマックスカット問題を解いたところ、品質の高い解を5 ms 以下の時間で得ることを実験的に確認した。特に、2000 ノードの完全グラフの最大カット問題を解いた場合、CPU 上で実装した Simulated annealing に比べて、約50 倍の速度で同程度の精度の解探索に成功した。

課題4：時分割多重 OPO のためのフォトニックデバイスとして集積化に取り組み、石英系平面光波回路による波長フィルタと PPLN を集積、および、OPO に必要となる2次高調波発生回路の構成を検討し、基本的動作を確認した。

### 2-2 成果

#### 課題1

図1に示すように、光ファイバ共振器中に1 km の高非線形光ファイバ(HNLF)を配置し、HNLF 中の2波長ポンプ・シグナルアイドラ縮退四光波混合を用いることで時分割多重 OPO 群を発生した。ポンプ光パルスの繰り返し周波数を10 GHz とし、共振器長を21 km に長延化することで、100 万を超える OPO 群の一括発生に成功した。発生した OPO 群の隣接パルス間の位相差を測定した結果を図2に示す。OPO 位相がゼロまたは $\pi$ に2値化していることを確認できた。さらに、位相差測定結果を閾値処理することで得た2値データが、NIST の乱数検定にポストプロセス無しで合格する品質の高い乱数となっていることを確認した。

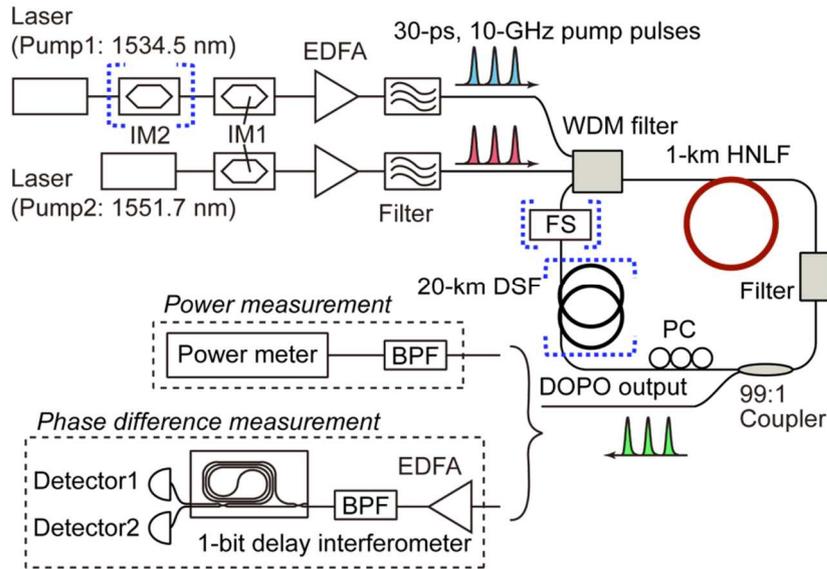


図 1: 10GHz クロック縮退 OPO 実験系

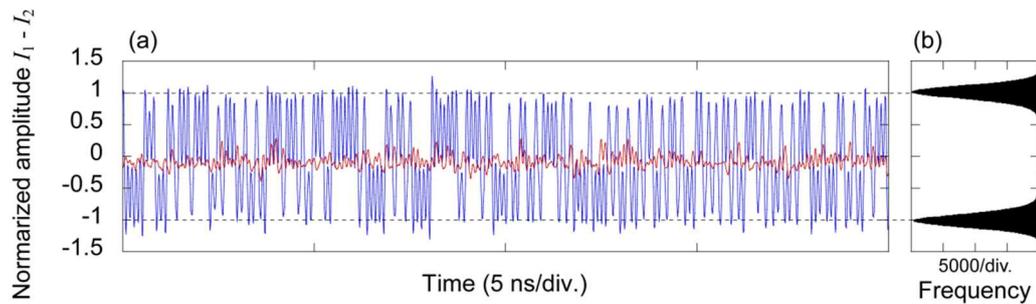


図 2: 隣接 OPO 間の位相差測定結果

### 課題 2

コヒーレント位相測定部においては、局部発振光に位相変調を印加し Pound-Drever 法を用いることで位相安定化に成功した。

### 課題 3

NTTが開発した周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) 導波路デバイスを用いて発生した 2000 個の縮退 OPO パルス群に対し、パルスが共振器を周回する毎に全 OPO の位相・振幅測定を行い、その結果を用いて FPGA により演算した結合信号を光パルスに重畳して OPO に帰還する「測定・フィードバック」法を実装したコヒーレントイジングマシンを実現した(図 3)。当該装置を用いて、2000 ノードの最大カット問題を解いたところ、高い精度の解を 5 ms 以下の時間で高速に得ることができた(図 4)。さらに、2000 ノードの完全グラフの最大カット問題を解いた場合、CPU 上で実装した Simulated annealing に比べて、約 50 倍の速度で同程度の精度の解を得ることを確認した。これにより、コヒーレントイジングマシンが、ある種の問題に対しては従来の計算機を上回る性能を得る可能性を示すことに成功した。

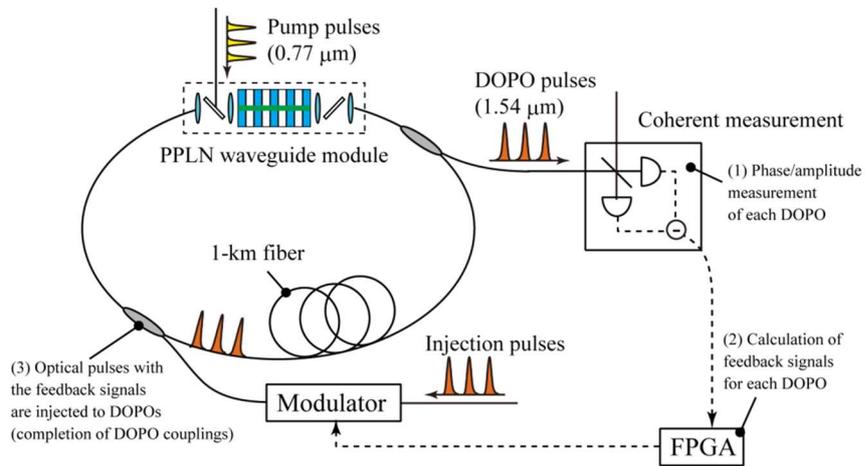


図 3: 測定・フィードバックに基づくコヒーレントイジングマシン

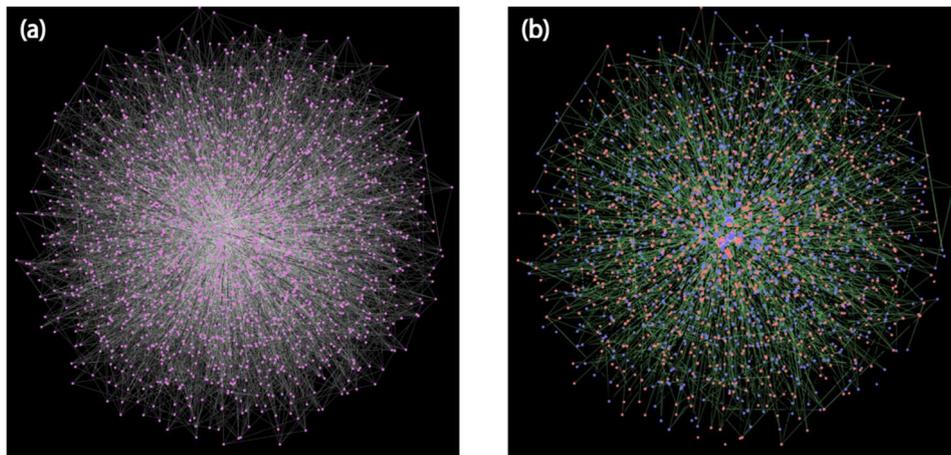
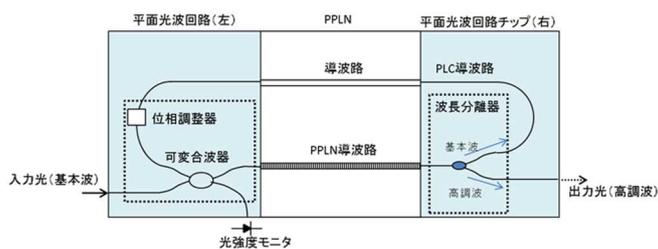


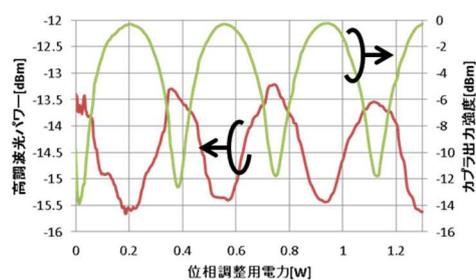
図 4: コヒーレントイジングマシンによる最大カット問題の解探索の例。(a)グラフ問題。ピンクの点がノードを、白い線がエッジを表す。(b)解探索結果。ノードが赤と青に分けられ、緑で示すエッジを切ることができた。5 ms 以下の計算時間でこの解を得た。

#### 課題 4

PPLN 導波路と石英系光導波路 (PLC) の集積化に取り組んだ。NTT で開発した異種材料の光導波路の接合技術とループバック無損失再結合光回路構成を適用し、フォトニックデバイスによる高機能化に向けて、PLC に波長フィルタ、および、位相/合波調整機能を集積化しループバックされた基本光と入力光を合波して PPLN に入射する高効率 2 次高調波発生回路の集積化検討を行い、高調波の発生の確認と特性向上のための課題を抽出することができた (図 5)。



(a) 集積型フォトニックデバイスの構成



(b) 出力特性

図5 作製した集積型フォトニックデバイスの構成と出力特性

(a) 作製した集積型フォトニックデバイスの構成。PPLN を PLC で挟みこみ、PLC により波長フィルタ、および、位相/合波調整機能を集積化 (b) ループバック光と入力光の合波特性 (相補ポートからの光強度モニタ出力特性) と高調波の発生出力

### 2-3 新たな課題など

- 現在のコヒーレントイジングマシンは、実験装置としては十分な安定性、再現性を示しているが、「計算機」としては非常に不安定と言える。今後装置として完成度を高めるにあたっては、長距離ファイバ共振器、コヒーレント測定、注入光の位相、光変調器のバイアスなど、光学系の長時間安定化が必要となる。
- 最大カット問題以外の組合せ最適化問題に適用するために、結合係数の多値化と磁場項の導入を行う必要がある。

### 3. アウトリーチ活動報告

無し