

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05377

研究課題名（和文）周波数領域光信号処理を利用した最適化演算加速器に関する研究

研究課題名（英文）Investigation of optical reservoir computing using frequency domain optical signal processing

研究代表者

清水 智（Shimizu, Satoshi）

国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワーク研究所フォトニックICT研究センター・主任研究員

研究者番号：10533440

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では半導体光増幅器(SOA)を伝搬する光コム信号のリザーバーコンピューティング適用を検討し、主として次の4点の成果を得た。広帯域光コム信号の振幅・位相測定手法を提案し、帯域幅150-GHzの信号を20-GHz帯域のコヒーレント受信器で測定可能にした。パルス伝搬の数値シミュレーションが可能なSOAのモデルを構築し数値シミュレーションによる検討を可能とした。数値シミュレーションにより形状の近いパルスの差異を強調出来ることを示し、リザーバーとしての可能性を示した。実験・シミュレーション両方においてSantaFe時系列の予測問題について、精度は高くないものの予測動作が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、光リザーバーコンピューティングの検討でこれまであまり注目されてこなかった周波数領域の活用に新たに着目したものとして学術的に意義があったと考えている。とくに、SantaFe時系列の予測問題における実験および数値シミュレーションによる基本動作実証は、光リザーバーコンピューティングにおける周波数領域の活用可能性を示すものとして意義深いものであったと考えている。今後、時間領域と周波数領域の両方を有効に活用することで処理能力を飛躍的に向上させることが期待でき、人工知能技術における学習・予測回路の高効率化に寄与できるものとして、社会的にも意義があったと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this research, we proposed and investigated the reservoir computing using optical comb signal propagating in the semiconductor optical amplifier (SOA). The main achievements of this project are as follows. 1. We proposed amplitude and phase measurement method for broad-band optical comb signal using low bandwidth optical coherent receiver and demonstrated the measurement of 150-GHz optical comb by using 20-GHz receiver. 2. We made numerical model of an SOA to establish the platform of numerical simulation, which can simulate the pulse propagation. 3. By using the numerical model, we demonstrate that slight differences in three similar optical short pulse can be emphasized by propagating through the SOA, and it can be used for optical reservoir. 4. Both in numerical simulations and experiments, we demonstrated the successful learning and inference operation of SantaFe time series, although the accuracy is not so high.

研究分野：光通信

キーワード：光コンピューティング 光コム 半導体光増幅器

1. 研究開始当初の背景

近年、深層学習を中心とした人工知能技術が大きな発展を遂げており、将来の科学技術の発展のみならず社会生活に必要な不可欠な技術となりつつある。一方で、精度の高い予測や認識を可能とするためには膨大な量のデータから学習を繰り返す必要があるが、表現力の高いモデルになるほど学習パラメータとそれを十分に学習させるための学習データが増えるため、学習にかかる時間と計算負荷が課題となっている。これに対して、中間層の重みをランダムな固定値として出力層のみを学習させるリザーブコンピューティングが有力な手法の一つと見られており、中でも光デバイスを用いて高速・低消費電力処理を目指す研究が増えだした状況であった。それまで光デバイスを物理リザーブ装置として用いた研究では、遅延帰還による時間領域での相互作用のみを利用したものがほとんどであり、周波数(波長)領域まで相互作用の範囲を広げた研究例は未だない状況であった。本研究は未利用の周波数領域までリザーブとしての利用を拡大するため、非線形媒質における光コム信号の波長間相互作用をリザーブとして利用する方法を提案したものである。

2. 研究の目的

本研究では、非線形媒質として半導体光増幅器(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)を利用し、多波長の光信号を同時に SOA へ入力した際の電子を介した複雑な波長間相互作用を物理リザーブ装置として利用したリザーブコンピューティングシステムの動作原理・基礎を確立し、学習演算の新たな高速化手法としての可能性を探ることを目的とする。

3. 研究の方法

図1に本研究で提案するリザーブコンピューティングの概念を示す。SOAに入力された光は増幅され電子を消費し、利得および屈折率の変化をもたらす。これにより波長間の相互作用が起こり、出力端では振幅・位相が大きく変化した光コム信号が得られる。このときの光信号の挙動は、電子・光子のレート方程式を用いて記述できる。この波長間相互作用による振幅・位相変化をリザーブとして利用可能であるかを実験・数値シミュレーションの両面から検討するため、SOAシミュレーションモデルの構築を進め、実験条件を数値計算上で再現できる環境を構築する。また、実験においては広帯域かつ多波長の光信号について振幅と位相を測定する手法を確立し、光リザーブの入出力光を観測する環境を構築する。構築したシミュレーションモデルに基づき数値計算シミュレーション上で動作条件等の検討を行い、その結果に基づき原理実証の実験を行う。

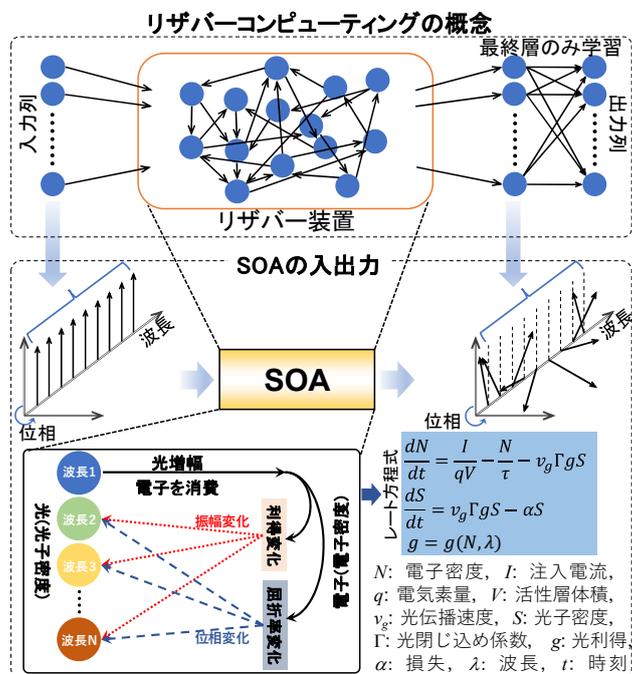


図1. 本研究で提案するリザーブコンピューティングの概念図。

4. 研究成果

1. 広帯域光振幅・位相観測手法の確立  
 本研究では、数十GHz~数百GHzにおよぶ広帯域な光コム信号の周波数成分についてその振幅と位相を観測する必要がある。一方で、一般的な光振幅・位相観測装置であるコヒーレント受信器

の帯域は 10~50-GHz 程度である．そこで，一般に用いられているデジタルコヒーレント受信方式を応用し，広帯域な光コムの特長を光フィルタで分割して観測後，デジタル演算により統合することで全帯域の観測を可能にする手法を確立した．図 2 は帯域幅 150-GHz，周波数間隔 12.5-GHz のコム信号を 20-GHz 帯域の受信器で観測した際のスペクトルと時間波形であり，時間波形と光スペクトルが再生されている．検証として，20-GHz 帯域の光コム信号を一括受信した場合と分割受信した場合を比較し差が小さいことを確認している(\*)．

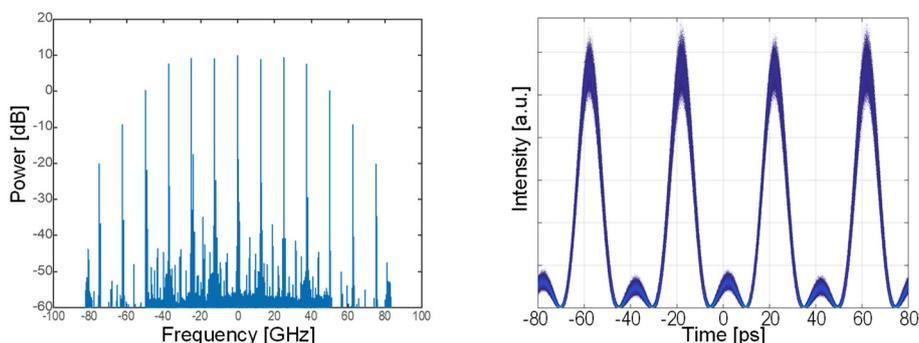


図 2. 20-GHz 帯域のコヒーレント受信器で観測した帯域幅 150-GHz の光コム信号のスペクトルと時間波形．

(\*) Satoshi Shimizu, et al, “Demonstration of coherent detection technique for broadband optical comb light source,” IEICE Electronics Express, vol. 18, no. 1, 2021.

## 2. SOA パルス伝搬解析とシミュレーションモデルの構築

本研究では，SOA を通過する光コム信号スペクトル成分の振幅・位相変化をリザーブとして利用することを提案している．そこで，実際に SOA を伝搬した光コム信号の振幅・位相がどの程度変化するかを実験により観測し，その状況を再現できるシミュレーションモデルの構築を試みた．具体的には，実験において帯域幅 225GHz，パルス幅約 20ps，繰り返し間隔 640ps (繰り返し周波数 1.5625GHz) の光信号をピークパワー+12dBm で入力し，入力および出力光の振幅と位相を前項の手法を用いて観測した．このときの入力および出力の振幅・位相波形を図 3 に示す．振幅・位相ともに入力と出力で大きく変化している様子が確認できた．

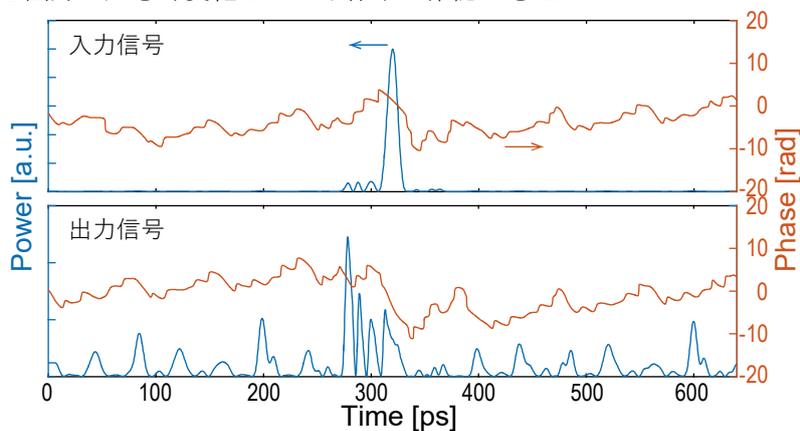


図 3. 実験における入力および出力の振幅・位相波形．

次に，SOA のシミュレーションモデルを構築するため，利得スペクトルの測定を行い，次式で表される利得モデルをフィッティングし，各パラメータを決定した．

$$g(N, \lambda) = \frac{g_p(N) - p(\lambda - \lambda_p(N))^2 + c(\lambda - \lambda_p(N))^3}{1 + \varepsilon S}$$

ここで， $g$  は利得， $N$  はキャリア密度， $\lambda$  は波長， $g_p$  はピーク利得， $\lambda_p$  はピーク利得波長， $S$  は光子密度， $\varepsilon$  は非線形利得圧縮係数， $p$  および  $c$  はそれぞれ 2 次および 3 次項係数であり，フィッティングにより  $g_p$ ， $\lambda_p$ ， $p$  および  $c$  を決定した．求めたモデルと伝達行列法を用いて SOA 内のパルス伝搬シミュレーションを行い実験結果と比較するため，上記の実験で測定した入力波形のデータを用いて出力波形を計算した結果を図 4 に示す．概ね傾向の一致する出力波形が得られ，パルス伝搬解析を行うモデルの妥当性が確認でき，SOA 内のパルス伝搬シミュレーションを行う環境が構築できた．

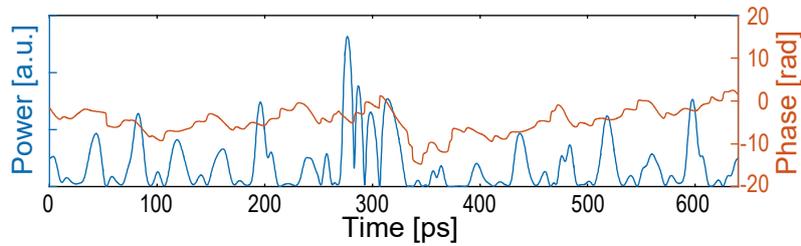


図 4. 実験の入力波形を用いて計算した出力振幅・位相波形.

### 3. シミュレーションによる類似パルス波形の伝搬特性解析

前項で得られた SOA シミュレーションモデルを用いて類似パルス波形の伝搬特性について検討した. 本検討では, 判別が難しい類似のパルス波形に非線形処理を施すことで差異が強調され, 出力では判別が容易になることを示すことが目的である. 入力したパルス波形は次の 3 種類である (図 5 左). ①帯域幅 100-GHz, ロールオフ値 0.5 のナイキストパルス, ②帯域幅 100-GHz, ロールオフ値 0.8 のナイキストパルス, ③半値全幅 10-ps の raised-cos パルス. これらの波形が SOA を伝搬した後の波形を図 5 右に示す. 3 種類の入力光パルスは時間波形における差異が小さいが, SOA の動的な利得変化により出力では互いに大きく異なる波形となる事が示された. この結果は, 利得飽和 SOA のリザーブへの適用可能性を示すものであり非常に意義があると考えている.

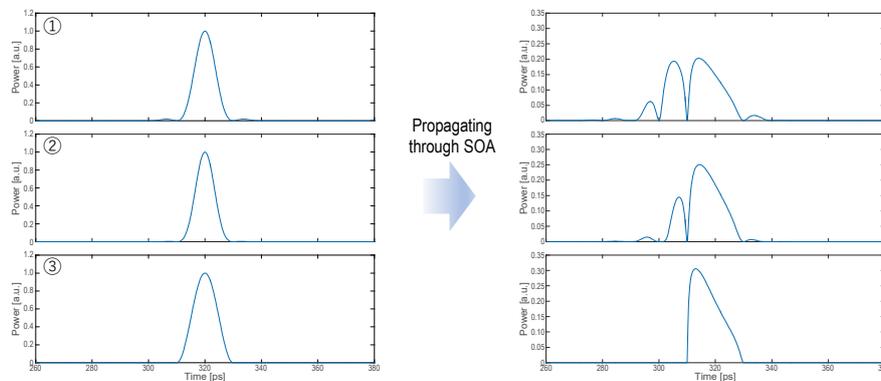


図 5. SOA 入力光パルスおよび出力光パルス波形.

### 4. SantaFe 時系列の予測問題に関する検討

次に上記動作結果の光リザーブコンピューティング応用について検討するため, 一般的なベンチマーク問題である SantaFe 時系列の予測問題について, 光コムのスペクトル成分に入力情報をマッピングした波形を SOA に入力し, その出力スペクトル成分を観測した. 観測された出力スペクトル成分は重み係数をかけて結合した後, 学習過程では教師データと照合され, 予測過程では予測値として出力される. 時系列 1000 点を用いて出力重み係数を学習し, 500 点を予測動作の検証に用いた. 図 6 は予測されるべき正解波形 (左), シミュレーションによる予測波形 (中央), および実験における予測波形 (右) である. シミュレーションにおいても実験に近い出力波形が得られており, 精度は高くないものの時系列予測可能な動作条件が存在することが確認できた. これにより, 本研究課題で提案した演算加速器の基礎動作実証が出来たと考えている.

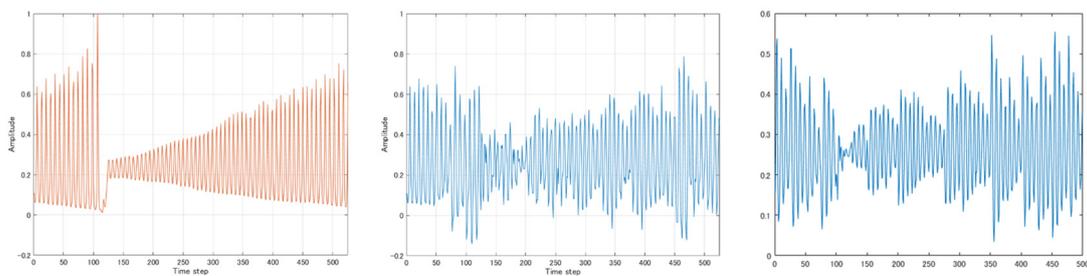


図 6. SantaFe 時系列の正解波形 (左) と実験における予測波形 (右).

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 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Satoshi Shimizu	4. 巻 19
2. 論文標題 Investigation of amplitude and phase evolution of a short-pulse propagating through a gain saturated semiconductor optical amplifier	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.19.20220057	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 -

1. 著者名 Satoshi Shimizu, Ryohei Kamikawa, Yuta Kaihori, Yu Yamasaki, and Tsuyoshi Konishi	4. 巻 18
2. 論文標題 Demonstration of coherent detection technique for broadband optical comb light source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.17.20200383	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 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Satoshi Shimizu
2. 発表標題 Numerical Investigation of Short Pulse Propagation in a Semiconductor Optical Amplifier for Application to Optical Reservoir Computing
3. 学会等名 OECC/PSC 2022（国際学会）
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------