

令和元年6月7日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18873

研究課題名（和文）半導体光増幅素子による100 GSAMPLE/s光量子化技術の研究

研究課題名（英文）Research on 100 GSAMPLE/s optical quantization using semiconductor optical amplifiers

研究代表者

松浦 基晴（Matsuura, Motoharu）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：40456281

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、半導体素子内で入力された光パワーに応じて発生する周波数シフト効果を利用して、光アナログ・デジタル変換のための独自の光量子化技術に関する研究を行った。周波数シフトされた光信号を切り出す光フィルタの設定・最適化や光信号入力パワーに対する光量子化性能の依存性などを詳細に調査し、最大で15レベルの光量子化を実現することに成功した。また、この際に必要となる光パワーは従来技術の1/100以下であることを明らかにし、提案系の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高速なアナログ信号をデジタル信号に変換する需要がデータ通信・解析などの多岐にわたる分野で急速に広がっている。このため、光領域でアナログ・デジタル変換を行う光アナログ・デジタル変換の研究開発が盛んに行われている。本研究では、これまででない、小型の半導体素子内で発生する周波数シフトを応用した光量子化技術によって、小型、省電力かつ高性能を実現する実証実験に取り組み、その有効性を明らかにしている。

研究成果の概要（英文）：In this work, we demonstrated an optical quantization technique using red frequency chirp in a semiconductor optical amplifier. First, we investigated the performance of optical filters for slicing input signal pulse induced by red frequency chirp. And, to optimize the optical quantization performance, we evaluated the input power dependence on the performance. Lastly, we successfully achieve 10-GSamples/s, 15-level optical quantization using frequency chirp in a quantum-dot semiconductor optical amplifier. The scheme has much lower input signal power than previously reported schemes.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：光A/D変換 光量子化 半導体光増幅器 量子ドット半導体光増幅器 周波数シフト

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

アナログ信号を標本・量子・符号化の3つのプロセスでデジタル信号に変換するアナログ・デジタル(A/D)変換の高速化が急務となっている。現在、従来の電子回路で構成されるA/D変換の処理速度は既に限界に達しており、抜本的な高速化の手段の一つとして、光領域で信号処理を行う光A/D変換の実現が強く望まれている。光A/D変換に関する研究は世界各地で進められているが、標準化された光パルスの強度のデジタル化(光量子化)が困難であるため、実用性の高い成果は報告されていない状況である。

我々は、量子ドット半導体光増幅器(以下、QD-SOA)内で発生する周波数シフト現象に着目し、独自の技術を用いた光量子化技術の提案を行っている。その一方で、光量子化数や連座奥データ列での動作等に課題があった。そこで、本研究では、この現象を活用した独自の光量子化技術によって、これまでの光量子化性能を凌駕する光A/D変換の実現を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、電子回路処理では困難な高速サンプリングパルス列での光量子化動作を実現する。併せて、本研究では、これまでに報告の無い、単一の半導体素子を用いた光A/D変換構成を有していることから、従来の光ファイバで構成された光A/D変換器と比較して、大幅な省電力効果を見込めるため、その具体的な光電力の削減効果を定量化する。

3. 研究の方法

実際にQD-SOAを使用した実験装置を独自に構成し、実験的な評価を実施する。まず、QD-SOA内で発生する周波数シフトの切り出しに用いる光フィルタが光量子化性能に与える影響を評価するため、光フィルタの特性評価と最適化を行う。また、QD-SOA内に入力されるサンプリングパルス列とプローブ光の光パワーのバランスによって発生する相互利得変調と周波数シフト量の関係を詳細に評価し、最適な入力パワーの導出を行い、10 GSAMPLE/sでの最大光量子化ビット数の達成を目指す。最終的に、最大光量子化ビット数を達成した設定条件において、必要となったサンプリングパルス列の入力光パワーから、提案技術に必要なとされる光スイッチングパワーを導出し、従来技術に対する省電力効果を明確化する。

4. 研究成果

提案する光A/D変換の有効性を検証するために実証実験を行った。波長1530 nmのモード同期半導体レーザから出力された繰り返し周波数10 GHzのパルス列を光変調器に入力し、パルスパターン発生器と同期したシグナル・ジェネレータで生成された10 GHz正弦波で変調を行い、光アナログ信号を光標本化したことを想定した10 GSAMPLE/sの光サンプリングパルス列を生成した。この信号光は光ファイバ増幅器で増幅後、光カプラでプローブ光と合波される。プローブ光は波長1559 nmの外部共振型半導体レーザで生成され、出力パワーは光可変減衰器で調整し、光カプラで信号光と合波されている。信号光とプローブ光は合波後、QD-SOAに入力される。ここで、SOAではなく、QD-SOAを利用した理由は、従来のSOAと比較して、QD-SOAは高速な利得回復時間を有しており、高速なサンプリング速度での実証実験には有利なため、本実験でも使用した。このQD-SOAはこれまでも伝送速度320 Gbit/sでの光信号処理実証実験に使用されている。QD-SOA内では、サンプリングパルスのピークパワーに対応した大きさのレッドチャープがプローブ光に発生する。プローブ光は増幅後、波長可変型の光フィルタに入力される。本実験では1台の光フィルタの透過波長(フィルタ短波長側の周波数(RSFF))をシフトさせている。実際には光フィルタのRSFFを変化させ、光量子化の性能評価を行っている。理想的にはより急峻なロールオフを有する光フィルタが必要であるが、使用した光フィルタにおいても十分な光量子化性能の実現が可能である。RSFFに応じて抽出したプローブ光のレッドチャープ成分は増幅後、光スペクトルアナライザと、フォトダイオードで光電変換された電気信号波形を帯域50 GHzのサンプリングオシロスコープでパルスのピークパワーレベルと波形の評価を行っている。

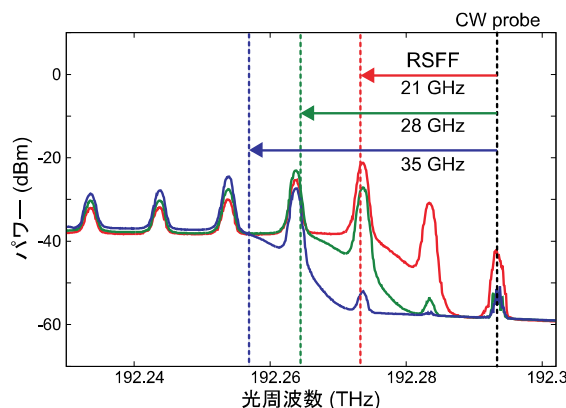


図1: RSFFを変化させたときのレッドチャープ成分の光スペクトル。

図1に光スペクトルアナライザで観測されたレッドチャープ成分の光スペクトルを示す。フィルタをシフトされる毎にスペクトル成分は低周波数側にスライドしていくのが確認出来る。一方、スペクトル成分はシフトしても 10 GHz 間隔に立つコム成分は共通して存在しているのがわかる。

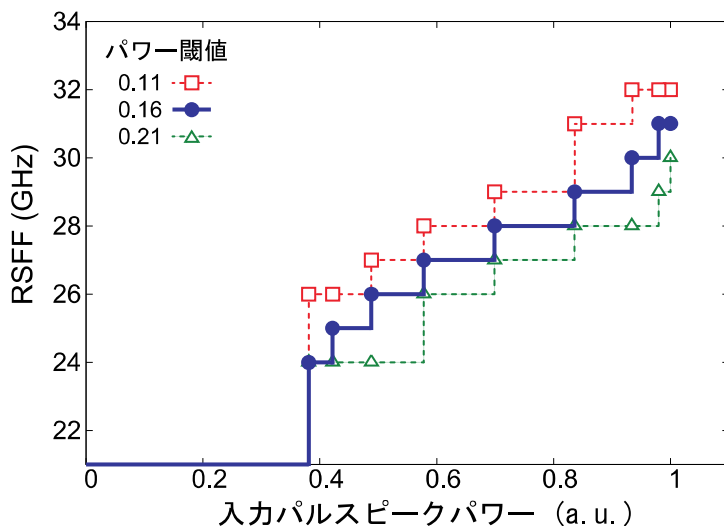


図2: 光 A/D 変換の光量子化特性。

光量子化性能の評価を行うために、入力したサンプリングパルス列を規格化し、出力パルスのピークパワーが設定した閾値を越えた（“0”から“1”となった）ときのRSFFの変化を図2に示す。閾値については過去の研究を参考に3つの値を任意に設定し、比較評価を行っている。図より、入力パルスのピークパワーが大きくなるにつれて、必要となるRSFFも大きくなっていくのがわかる。ここで、閾値を規格化させたパルスのピークパワーの0.16と設定したときに最大8レベルのステップが得られることが確認され、8レベルの光量子化が行えることが示された。さらに最新の研究成果においては、15レベルの光量子化の実証実験にも成功している。

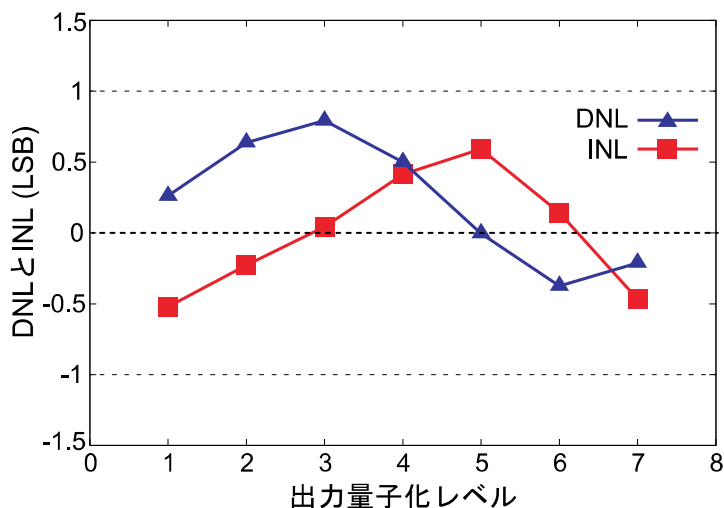


図3: RSFF を変化させたときのレッドチャープ成分の光スペクトル。

実際のA/D変換としても有用性を示すため、積分非線形誤差（INL: Integral NonLinearity）と微分非線形誤差（DNL: Differential NonLinearity）による性能評価も行った。前者は理想的な光量子化性能における各ステップの中点を結んだ際の各量子化レベルにおけるパワー差を表し、後者は理想的なステップ幅に対する実測のステップ幅のパワー差を意味する。INLとDNLによる光量子化特性の性能評価を図3に示す。この評価において、 ± 1 LSB（最低有効ビット数, LSB: Least Significant Bit）以下に抑えることが出来れば、ミッシングコードを発生せずにA/D変換を行えることになる。図より、INLは最大+0.79 LSB、DNLは最大+0.59 LSBとなり、全てのステップで ± 1 を下回っていることから、提案技術の有効性を示すことを実証した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

M. Matsuura and G. Ito, " Selective amplitude-level regeneration based on blue-chirp spectral slicing using QD-SOAs, " OSA Opt. Express, 査読有, vol. 27, pp. 3030-3038 (2019).

H. Hoshino, T. Okada, and M. Matsuura, " Photonic analog-to-digital conversion using red frequency chirp in a semiconductor optical amplifier, " 査読有, OSA Opt. Lett., vol. 43, pp. 2272-2275 (2018).

松浦基晴, " 半導体光増幅器を用いた光アナログ・デジタル変換, " 月間 OPTRONICS, vol. 441, pp. 136-140 (2018).

T. Ohtsuki and M. Matsuura, " Wavelength conversion of 25-Gbit/s PAM-4 signals using a quantum-dot SOA, " IEEE Photon. Tech. Lett., 査読有, vol.30, pp. 459-462 (2018).

〔学会発表〕(計 5 件)

M. Matsuura and G. Ito, " Selective mark or space level amplitude regeneration using blue chirp spectral slicing in a QD-SOA, " OFC 2019, 査読有, W2A.37 (2019).

T. Okada, H. Hoshino, and M. Matsuura, " 10-GSample/s, 15-level optical quantization using frequency chirp in a quantum-dot SOA, " OECC 2018, 査読有, P1-26 (2018).

星野弘樹, 岡田拓也, 松浦基晴, " 量子ドット半導体光増幅器の周波数チャープを用いた光 A/D 変換のための光量子化レベル向上, " 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会, PN2017-108, (2018).

大槻樹矢, 谷津智也, 松浦基晴, " データセンタのための量子ドット半導体光増幅器を用いた PAM-4 光波長変換, " 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会, PN2017-95, (2018).

T. Ohtsuki, T. Yatsu, and M. Matsuura, " Regenerative wavelength conversion of PAM-4 signals using XGM with blue-shift filtering in a QD-SOA, " CLEO/PR/OECC/PGC 2017, 査読有, 2-2L-2 (2017).

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mm.cei.uec.ac.jp/index.html>

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし