

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13988

研究課題名（和文）量子ドット半導体光増幅器を用いた超高速光A/D変換の研究

研究課題名（英文）Research on ultrahigh-speed photonic A/D conversion using QD-SOAs

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） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、半導体素子の光増幅過程で発生する固有の周波数チャープ現象を光強度-周波数変換に応用することで、新しい原理に基づいた光アナログ-デジタル変換技術を提案し、その有効性を実証実験によって明らかにすることを目的としている。

実証実験の目標とした動作速度は10 GSample/s以上のため、半導体素子には量子ドット半導体光増幅器を使用し、10 GSample/sの光アナログ信号から、光A/D変換のコア技術となる光量子化の性能評価と実証実験を行った。これにより、実際の連続的な光アナログ信号から4レベルを越える光量子化が行えることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this work, we propose a novel optical quantization technique for photonic analog-to-digital (A/D) conversions based on intensity-to-frequency conversion using frequency chirp in a semiconductor optical amplifier (SOA). To show the feasibility of this technique, we experimentally demonstrated 10-GSamples/s optical quantization using a quantum-dot SOA (QD-SOA), because we show the capability of ultrahigh-speed operation of the photonic A/D conversion. As a result, we successfully achieved 4-level optical quantization using the QD-SOA. The presented scheme has a simple configuration and possibility of the monolithic integration. The obtained results show that the presented scheme is useful for future photonic analog-to-digital conversions.

研究分野：光通信システム

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 周波数チャープ

### 1. 研究開始当初の背景

アナログ信号を標本・量子・符号化によって、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。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、標本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。

我々は、これまでに光信号処理技術の研究において、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、先行研究成果として、半導体素子としては世界トップレベルとなる動作速度 320 Gbit/s (1 秒間に 3,200 億ビット) での実証実験に成功している。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 変換の実現を目指した。

### 2. 研究の目的

提案する光 A/D 変換器を実際に構成し、光標本化されたアナログ信号から、光量子化を介し、光デジタル信号に変換するまでの実証実験を行う。まず、光量子化に必要な QD-SOA の利得回復時間と隣接するサンプリングパルスに与える光パルス振幅の影響を詳細に評価し、実現可能なサンプリング速度の限界を見極める。また、周波数シフト量と光アナログ信号の信号振幅に対する関係性を評価し、提案する光量子化技術に有効であることを実証する。これを基に、実際の光 A/D 変換器を構成し、実用レベルでこれまでに報告のない目標値として、サンプリング速度 40 GS/s (ギガサンプル毎秒)、量子化ビット数 6 ビットの光 A/D 変換の実証実験を達成する。

QD-SOA は、従来の半導体光増幅器と比較して、高利得・広帯域性に優れた光増幅素子として注目を集めてきたが、周波数シフト特性などの未だ明らかにされていない現象も存在し、応用技術についての報告も少ない。一方、申請者は予てから QD-SOA 特有の利得特性に強い興味と大きな可能性を抱き、これを応用した光信号処理技術に関する研究で、当該分野において多くの研究公表を既に行っている。本研究課題で QD-SOA の新しい応用技術が実証されれば、国際的にも先導性の高い研究開発のもと、光 A/D 変換の新しいブレイクスルーに繋がる技術の確立も期待出来ると考えている。

### 3. 研究の方法

提案する QD-SOA による光量子化技術を用いた光 A/D 変換器の実用性を明確化する。まず、QD-SOA で実現可能なサンプリング速度の限界を見極めるため、利得回復時間に起因する光サンプリングパルス間隔に対する光パ

ルス強度依存性を詳細に評価し、超高速動作のための指針を示す。さらに、独自の周波数シフト測定法により、光パルスの強度と周波数シフト量に比例関係があることを明確化する。これらの基本特性を基に、QD-SOA で周波数シフトを発生した出力サンプリング信号の高速応答特性と使用するローパス光フィルタのパス周波数シフト量に対する光量子化性能の評価とシステムパラメータの最適化を行い、提案する光 A/D 変換器を構成し、サンプリング速度 40 GS/s、量子化ビット数 6 ビットを目標値とした光 A/D 変換の実証実験を行い、その有効性を明らかにすることを目指した。

### 4. 研究成果

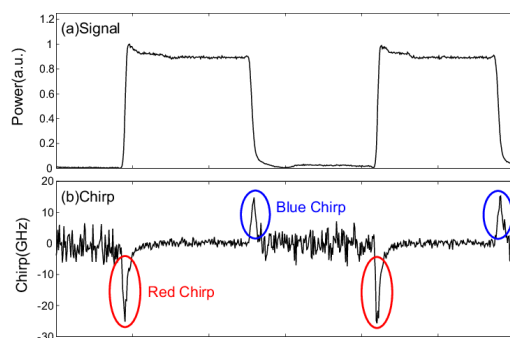


図 1 : SOA の周波数チャープ例

まず、光量子化の基本となる周波数チャープに関する特性評価を行った。図 1 に SOA の周波数チャープ特性を示す。(a)は SOA で増幅を行った後の出力信号、(b)はその際に発生する周波数チャープである。入力信号強度の変化に伴い、増幅によるキャリア密度の変化が起きる。それに伴い SOA 内の媒質の屈折率が変化するために搬送波周波数が瞬間的にシフトする周波数チャープが発生する。

図 1 を例にすると、信号が“0”である部分では、キャリア密度の変化は少ないため、周波数チャープは生じない。次に信号が“0”から“1”に変化する場合、増幅にキャリアが消費され、キャリア密度が大きく変化する。それに伴い、搬送波周波数が低周波数 (長波長) 側にシフトするレッドチャープが起こる。次に信号が“1”の部分では増幅によりキャリアが消費されるが、駆動電流によりキャリアが一定に供給されるため、キャリア密度の変化は少ない。よって、周波数チャープは生じない。さらに、信号が“1”から“0”に変化する場合、増幅によるキャリアの消費は少なくなるが駆動電流による供給は続く。よって、キャリア密度は増加するため、屈折率変化が発生し、搬送波周波数が高周波数 (短波長) 側にシフトするブルーチャープが起こる。SOA、QD-SOA ではブルーチャープは信号強度の増加に伴って、チャープ量の増加はあまりない。これは対して、レッドチャープは信号強度の増加に対して、シフト量の増加が見ら

れ、レッドチャープが信号強度に強く依存することがわかり、このレッドチャープの特徴を利用して、光量子化のための光強度-周波数変換の実現を試みた。

光量子化性能を明らかにするために実証実験を行った。実験では、光アナログ信号源として、モード同期レーザ (MLLD) で中心波長 1530 nm、10 GHz の短パルス列を生成し、偏波コントローラ (PC) で偏波を調整した後、ニオブ酸リチウム変調器 (LNM : LiNbO<sub>3</sub> Modulator) に入力し、シグナルジェネレータ (SG) で生成した 2.5 GHz の正弦波を LNM に入力し、4 つの強度状態を持つ光サンプリングパルスを構成した。エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) で増幅後、5 nm のバンドパスフィルタ (BPF) で自然放光雑音を取り除き、サンプリングパルスの QD-SOA への入力パワーを -17.4 dBm に調節した。外部共振器レーザ (ECL) で波長 1559 nm の CW 信号を生成し、QD-SOA への入力パワーを 3.9 dBm に調節した。それぞれの偏波を調整した後、光カップラ (OC) で合波し、QD-SOA へ入力した。QD-SOA の駆動電流は 1600 mA に固定し、アイソレータ (ISO) は QD-SOA の発振を防ぐために挿入した。サンプリングパルスを増幅する際に発生する QD-SOA 内の屈折率変化により、CW 信号にもレッドチャープが発生した。本方式ではレッドチャープを受けた CW 信号を一台の矩形波型バンドパスフィルタで高周波側のトップ部分を CW 信号波長である 1559 nm から低周波側に 10 GHz、23 GHz、38 GHz シフトさせ、光量子化性能の評価を行った。出力信号は EDFA で増幅し、OC で分波した後、光スペクトラムアナライザ (OSA)、フォトダイオード (PD) に入力した。OSA でスペクトルを観察し、オシロスコープ (OSC) で PD によって光電変換された波形を観察することで光量子化の性能評価を行った。

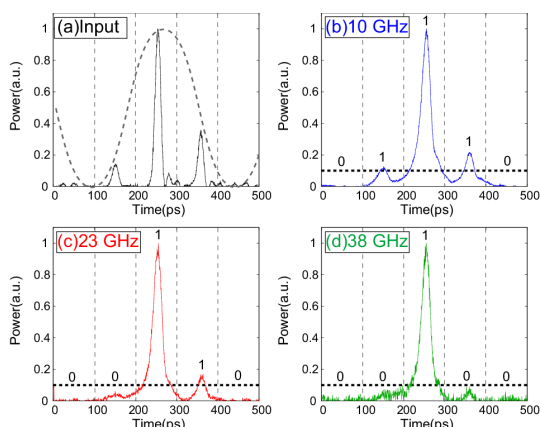


図 2 : 入力波形と量子化された出力波形

図 2 (a) に規格化した QD-SOA への入力信号波形、(b)(c)(d) に Rectangular-BPF を CW 信号波長 1559 nm から低周波側に 10 GHz、23 GHz、38 GHz シフトさせた際の規格化した出力波形を示す。図中の水平の点線は

Rectangular-BPF の透過の有無を判別し、パルスの有無を判断するための基準線である。

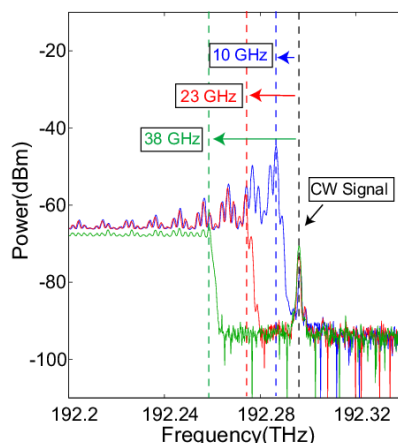


図 3 : 図 2 b,c,d におけるスペクトル

また、図 3 に図 2 (b)(c)(d) における出力スペクトルを示す。図 2 (b) に観察できるようにシフト量が 10 GHz の場合は、入力波形においてパルスが存在する部分では十分なパワーを持つ出力パルスが得られた。さらに図 2 (c) のように 23 GHz シフトさせたい場合は、もっとも強いパワーを持つ中心のパルスとその右側の 2 番目強いパルスのみ出力パワーが得られた。さらに 38 GHz シフトさせた場合は、中心のパルスのみ十分な出力パワーが得られた。よって、4 レベルの量子化が確認された。

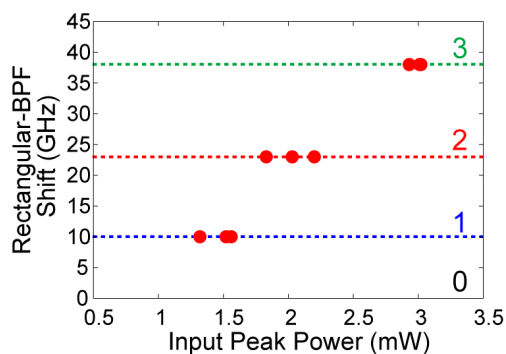


図 4 : シフト量とピークパワーの関係

さらに同じ実験系を用い、PPG のクロックの Delay を変化させることで入力パルスを変化させ、入力パルスのピークパワーと Rectangular-BPF のシフト量の関係についての評価を行った。その結果を図 4 に示す。シフト量が 10 GHz の Rectangular-BPF を透過できない最大のピークパワーは 1.56 mW であった。23 GHz では 2.20 mW、38 GHz では 3.02 mW であった。図 4 で観察できるようにシフト量 10 GHz、23 GHz、38 GHz において量子化レベルが 4 レベルであることを確認した。以上より、提案方式での量子化に成功し、その有効性を実証した。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

M. Matsuura, K. Mizusaka, N. Oka, All-optical OOK to multi-level PSK format conversion using a self-generating optical clock, IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有, Vol.28, No.14, 2016, pp.1577-1580,

DOI:10.1109/LPT.2016.2554623

M. Matsuura, Y. Minamoto, Optical powered and controlled beam steering system for radio-over-fiber networks, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol.35, No.4, 2017, pp.979-988,

DOI:10.1109/JLT.2016.2631251

[学会発表](計 2 件)

二宮典彦、雨宮将平、星野弘樹、松浦基晴、量子ドット半導体光増幅器内の周波数チャープを用いた全光量子化、電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会、PN2016-104、2017年3月7日、大濱信泉記念館(沖縄)

N. Ninomiya, H. Hoshino, M. Matsuura, Optical quantization based on intensity-to-frequency conversion using frequency chirp in a QD-SOA, OFC 2017, 2017年3月23日、Los Angeles(USA)

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: 全光アナログ・デジタル変換装置および全光アナログ・デジタル変換方法

発明者: 松浦基晴、二宮典彦

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許願 2017-033261 号

出願年月日: 2017年2月24日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松浦 基晴 (Motoharu Matsuura)

電気通信大学・情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 40456281