

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560484

研究課題名(和文)隣接パルス間位相を安定化した光クロック通倍回路に関する研究

研究課題名(英文)An optical clock multiplier with phase stabilized between adjacent optical pulses

研究代表者

戸田 裕之(Toda, Hiroyuki)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：00202200

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：光カップラを用いた光クロック4通倍回路を作成して10GHz～40GHzの通倍実験を行い、不要サイドバンド抑圧比17dBでRZ/CS-RZ光クロックを得た。

光クロック8通倍回路のシミュレーションを行った。制御光取り出しのためのOBPFには非常に急峻な特性が必要となることがわかった。この結果、目標としていた一台のみの制御光取り出しOBPFで光クロック16通倍回路を安定化動作させるのは困難であることが明らかとなった。

偏波保存ファイバを用いた光クロック2通倍回路を作成し、RZ/CS-RZ光クロックにおいて25dB/22dB以上の不要サイドバンド抑圧比を得た。

研究成果の概要(英文)：We demonstrate a phase stabilized quadruple OTDM multiplier for RZ/CS-RZ optical clock with optical couplers. An optical bandpass filter (OBPF) was used to filter the desired sidebands from the multiplier output, and the filtered output was used for the stabilization. 10 GHz optical clock was multiplied to 40 GHz with 17 dB undesired sideband suppression ratio.

We made a numerical simulation of octuple OTDM multiplier for RZ/CS-RZ optical clock. It turned out that very steep OBPF characteristic was required for filtering the desired sidebands, and which conclude that realization of 16 times OTDM multiplier with one OBPF for phase stabilization is difficult.

We made a phase stabilized 2 x OTDM multiplier with polarization maintaining optical fiber. 10 GHz optical clock was multiplied to 20 GHz with undesired sideband suppression ratio of > 25 dB and > 22 dB for RZ and CS-RZ optical clock, respectively.

研究分野：光通信

キーワード：光時分割多重 光ファイバ通信 光クロック通倍 遅延干渉計

1. 研究開始当初の背景

40Gbit/s を超える超高速信号は電子回路で扱うことが非常に難しいため、将来の高速光ファイバ通信において、その発生や伝送には光時分割多重 (optical time-division multiplexing; OTDM) 技術が用いられると期待されている[1]。OTDM 多重回路は、下図のように、光信号に遅延時間を与えて合波することで、例えば 4 つの 40Gbit/s 電気信号と 40GHz 光クロックから 160Gbit/s の光信号を生成したり (図 1)、入力光クロックパルスの繰返し周波数を通倍させる (図 2) ものである。

このような OTDM 技術を用いた光ファイバ通信では、隣合う光パルスの位相差を安定化しないと、アイ開口や伝送特性の劣化につながる。光クロック通倍の場合では、出力光クロックの周期と同程度のパルス幅の光源を用いると、出力光クロックの立ち上がり/立ち下りのタイミングが変動する。そのため、OTDM 光回路においては、光パルス間位相の制御・安定化は重要な課題である。

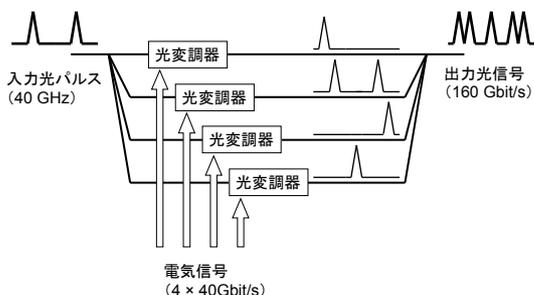


図 1 光時分割多重回路 (4×40Gbit/s→160Gbit/s)

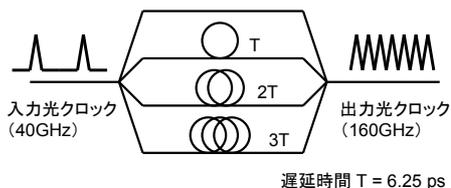


図 2 光クロック通倍回路 (40GHz→160GHz)

2. 研究の目的

2倍 OTDM 光回路の基本構造は、干渉計の二つのアームに時間差 (光路差) を設けた遅延干渉計である。この干渉計の光路差を安定化すれば、光パルス間位相を安定化できる。研究代表者はこれまでに、遅延干渉計の安定化に波長可変 CW レーザを用い、CW レーザと光パルスの光周波数に差をつけて光パルス間位相を制御する方法を提案し[2]、遅延干渉計を 2 段直列に接続した光クロックの 4 通倍回路の基本動作を確認した[3, 4]。本手法は、波長可変レーザが必要となるものの、比較的簡単に制御を行うことができ、ビットレート程度の高速電子回路が一切不要であるという特長を有する。さらに、80Gbit/s および 160Gbit/s OTDM 多重回路 [5] の出力から光

帯域通過フィルタを用いて適切なサイドバンド (側波帯) を取り出し、これを干渉計の安定化用制御光として、出力の隣接光パルス間位相を安定化することを提案し、基本動作を確認した[6, 7]。

本研究は、これらの研究成果の光クロック通倍回路への応用を目指して、さらに発展させるものである。最終的に、4 倍光クロック通倍回路を 2 段直列に接続し、16 倍光クロック通倍回路 (10GHz→160GHz) を作成して動作確認を行う。ここで、制御光取り出しのための光帯域通過フィルタは、一台のみとする。

3. 研究の方法

図 3 は遅延干渉計による光クロック 2 通倍回路で、16 倍光クロック通倍回路の基本単位となるものである。その動作原理は<引用文献>の[6]で報告した。まず、入力光パルスが入力される。遅延ファイバは圧電素子に巻かれており、印加電圧に応じて微小な位相変調 (ディザリング) をかけることができる。出力光クロックから適切なサイドバンドを光フィルタで取り出して安定化用制御光とする。強度変調成分をロックインアンプで検出すると、制御光パワーが最小になる点または最大になる点のいずれかに安定化できる。光帯域通過フィルタで偶数次サイドバンドを制御光として取り出した場合、制御光パワーが最大 (最小) とすると、隣接光パルス間位相は 0 (π) となる。奇数次サイドバンドを取り出した場合は、制御光パワーが最大 (最小) とすると、隣接光パルス間位相は π (0) となる。隣接光パルス間位相が 0 または π の時、RZ (return-to-zero) 光クロックまたは CS (carrier suppressed; キャリア抑圧) -RZ 光クロックが得られる。

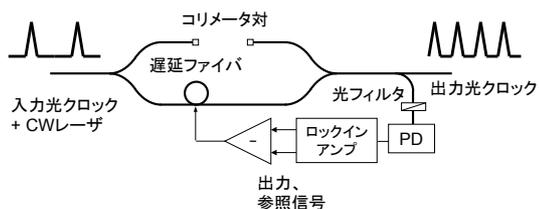


図 3 提案した光クロック 2 通倍回路

図 3 の光クロック 2 通倍回路を 2 台直列に接続した光クロック 4 通倍回路において、制御光取り出しのための光フィルタを、後段の通倍回路出力のみに置いた構成を考え、制御回路の動作をシミュレーションによって検討する。さらに、光クロック 2 通倍回路を 4 台直列に接続した光クロック 16 通倍回路において、制御光取り出しのための光帯域通過フィルタを、後段の通倍回路出力のみに置いた構成を考え、制御回路の動作をシミュレーションによって検討する。最終的には光クロック 16 通倍回路を構成し、10GHz→160GHz の通倍実験を行う。出力光パルスの光スペクトルと時間波形を観測して、所望の動作を検

証する。

4. 研究成果

図4は光クロック4通倍回路の構成である。図3の光クロック2通倍回路を2台直列に接続した構成で、制御光取り出しのための光帯域通過フィルタ(OBPF)を、後段の通倍回路出力のみに置いている。まずシミュレーションを行い、OBPFの中心周波数を調整して2次サイドバンド/0次サイドバンドのみを取り出して制御光とし、制御光パワーが最大となるように制御回路を動作させることで、RZ/CS-RZ光クロックが得られることを確かめた。

図5(a)(b)は、実験で用いたパルス光源であるモード同期レーザー(MLL、パルス幅10ps)と、0次サイドバンドを中心波長としたOBPF特性およびOBPF出力の、光スペクトルの観測結果である。OBPFには帯域幅0.17nmのファイバブラッググレーティングを用いたが、10GHz離れた隣接サイドバンドを抑圧するには十分に狭帯域ではない。そのため、隣接サイドバンドである±1次サイドバンドの減衰量が1.7dBしかないことがわかる。

このクロストークの影響を含めて再度シミュレーションを行ったところ、OBPFの中心波長を0次サイドバンド/2次サイドバンドとして制御光を取り出し、制御光パワーが最小となるように制御回路を動作させることで、RZ/CS-RZ光クロックが得られることを確かめた。制御光パワーの最大値で安定化するより最小値で安定化した方が、パルス光源の強度変動や各種雑音の影響は受けにくいいため、クロストークがあった方が、安定化がより容易になることになる。

図6(a)(b)は、40GHz RZ/CS-RZ光クロックが得られるように安定化させた時の出力の光スペクトルである。不要サイドバンド抑圧比は17dBが得られた。図7はRZ光クロックが得られるように安定化させた時の出力の時間波形である。安定化を行う前、パルスの裾の部分に強度変動が観測されたが、安定化を行うことで、強度変動が抑圧された。

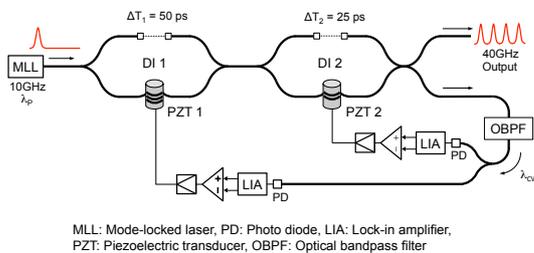
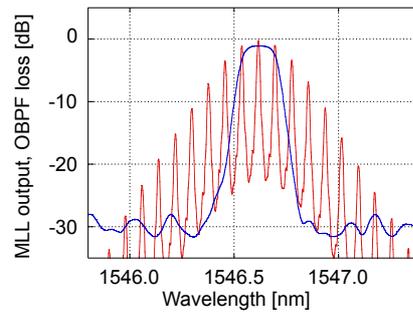
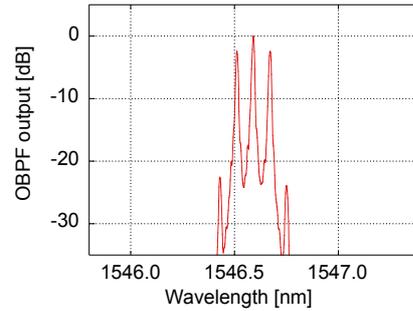


図4 光クロック4通倍回路

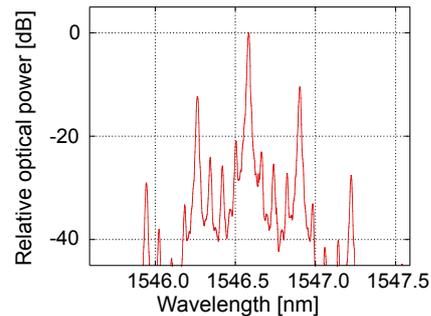


(a) MLL出力とOBPF特性

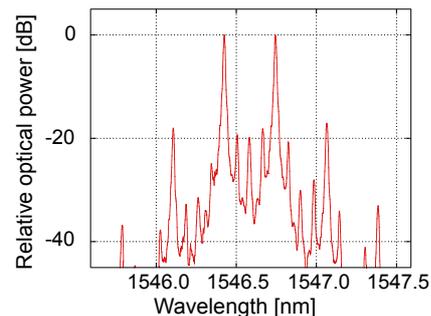


(b) OBPF出力カスペクトル

図5 パルス光源とOBPF出力の光スペクトル



(a) RZ出力



(b) CS-RZ出力

図6 40GHz 4通倍出力の光スペクトル

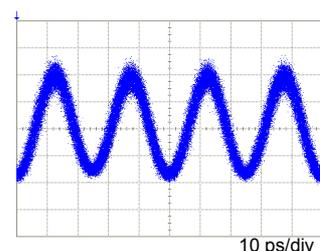


図7 40GHz RZ出力光クロックの時間波形

続いてOBPF特性の最適化を図るためのシミュレーションを行った。図8のようにOBPFの周波数特性を台形として近似し、0dB帯域幅に対する20dB帯域幅の比をシェープファクターとして定義した。図9は、初段と2段目の通倍回路の位相差 $\Delta\Phi_1$ と $\Delta\Phi_2$ に対する制御光パワーの計算結果の例である。OBPFで取り出した制御光パワーの最小点が周辺より6dB以下(図の"Depth of the minimum")なら制御可能であるとして、OBPFの0dB帯域幅とシェープファクターに対するOBPF中心周波数の許容誤差を求めた。図10に計算結果を示す。シェープファクターが小さくなるほど、すなわちフィルタ特性が急峻となるほど0dB帯域幅の最適値は広くなり、中心周波数の許容誤差も大きくなることわかる。例えばシェープファクターが2.5のOBPFであれば、0dB帯域幅の最適値は20GHzであると求められる。

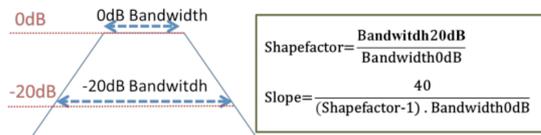


図8 OBPF特性の台形近似

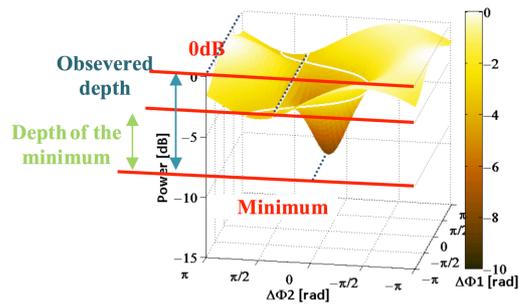


図9 OBPFで取り出した制御光パワーの計算例

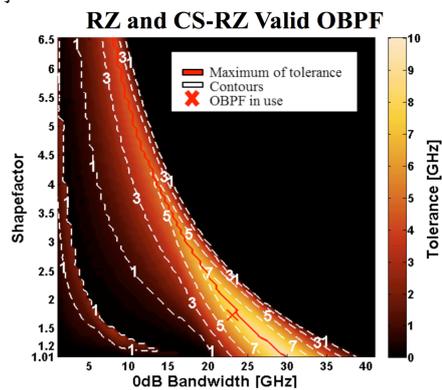


図10 OBPF中心周波数の許容誤差

つぎに光クロック2通倍回路を3台直列に接続した光クロック8通倍回路(図11)のシミュレーションを行った。制御光取り出しのための光フィルタ(OBPF)は、最後段の通倍回路出力のみに置いている。図12は、各段の通倍回路の位相差 $\Delta\Phi_1 \sim \Delta\Phi_3$ に対する制御光パワーの計算結果の例である。

$\Delta\Phi_1 = \Delta\Phi_2 = 0$, $\Delta\Phi_3 = \pi$ の時に出力はCS-RZ光クロックが得られるが、この時にOBPFで取り出した制御光パワーが最小となることがわかる。しかしながら、OBPFに要求されるシェープファクターは1.6以下と、非常に急峻な特性が必要となることがわかった。この結果、目標としていた一台のみの制御光取り出しOBPFで光クロック16通倍回路を安定化動作をさせるのは困難であり、図4の光クロック4通倍回路を2段直列接続した構成が現実的であることが明らかとなった。

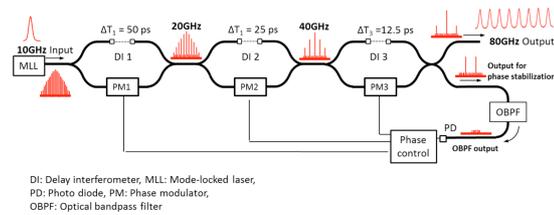


図11 光クロック8通倍回路の構成

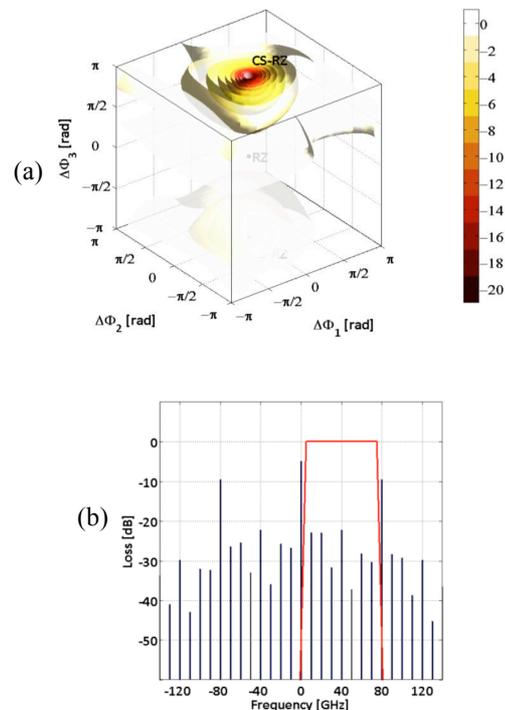


図12 (a) OBPFで取り出した制御光パワーの計算例と(b) OBPF特性と制御光の光スペクトル

図13のように、通倍回路を2入力2出力の3dB光カップラを用いて構成した場合を考える。この場合、通倍回路全体の損失は、原理的に最後の光カップラによる3dBの損失のみとなる。しかしながら、出力光クロックの各ピークパワーを等しくするためには、各カップラの分岐比が50%で、二つの入力出力分岐特性が同一でなければならないことが計算で示される。光カップラにこれらの条件が満たされない場合は、出力光クロックの各ピークパワーが等しくならず、非線形光学効果を利用した光スイッチのように光クロック

クのピークパワーが重要な動作パラメータとなる用途では問題となる。

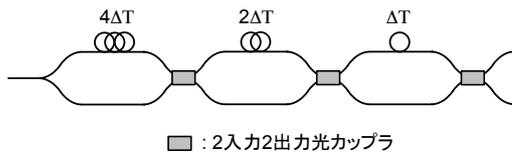
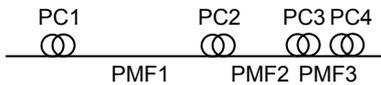


図 13 2 入力 2 出力光カップラを用いた光クロック 8 通倍回路の構成

これまで述べた通倍実験では、各 2 通倍回路を、1 入力 2 出力、2 入力 1 出力の光カップラで構成し、各通倍回路において出力光クロックのピークパワーが等しくなるように調整した。この場合、図 7 のような各ピークパワーが等しい出力光クロックを得ることができるが、通倍回路全体の損失は、通倍器の段数を n とすると、原理的に $(3 \times n)$ dB となる。



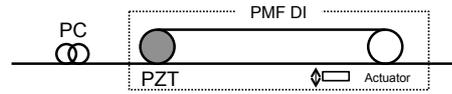
PC: polarization controller, PMF: polarization maintaining fiber

図 14 偏波保存ファイバ (PMF) を用いた光クロック 8 通倍回路の構成

この問題を解決するために、通倍回路を偏波保存ファイバ (PMF) で構成することを考えた (図 14)。偏光制御素子 PC1 で、入力光クロックの偏光を偏波保存ファイバ PMF1 の両直交偏光モードに等分配されるように調整する。PMF1 の長さは、直交偏光モード間の群遅延時間差が所望の遅延時間となるようにする。2 通倍された光クロックが、PC2 によって PMF2 の両直交偏光モードに等分配されるようにする。これを繰り返して n 段の光クロック通倍回路を構成する。PMF を用いた光クロック通倍回路で出力光クロックの各ピークパワーが等しくなるためには、PC の精度と PMF の偏光クロストークに条件が課せられると考えられるが、詳細の検討は今後の課題である。PMF を利用した OTDM 多重回路は、以前より OTDM 伝送実験の送信側多重回路としての報告があるが、本光クロック通倍回路は、多段接続時の損失増加の問題を解決するためのものである。

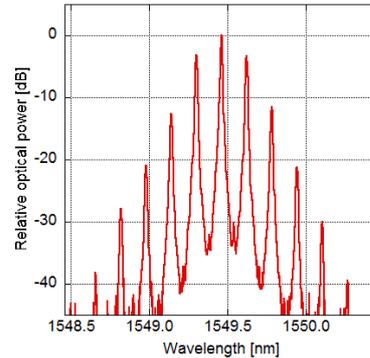
実際に偏波保存ファイバを用いて 10GHz → 20GHz の 2 通倍回路を構成した。使用した PMF は、2 つの直交偏光モード間の群速度差が 1.24 ps/m であったので、遅延時間を 50 ps とするために、長さを 39 m とした。PMF は、図 15 のように円筒形状のディザリング用 piezo 素子と樹脂との間に巻き、PMF を伸張させることで遅延時間を微調整した。位相安定化のための位相制御は、アクチュエータで PMF 側面に圧力をかけて行った。図 16(a)(b)は、20GHz RZ/CS-RZ 光クロックが得られるように安定化させた時の出力の光ス

ペクトルである。不要サイドバンド抑圧比は、RZ 光クロックにおいて 25dB 以上、CS-RZ 光クロックにおいて 22dB 以上が得られた。

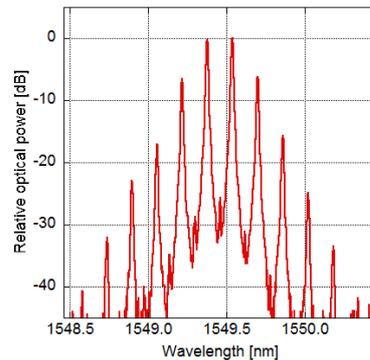


PZT: Piezoelectric Transducer, PMF: Polarization Maintaining Fiber, PC: Polarization Controller.

図 15 作成した PMF による光クロック 2 通倍回路の構成



(a) RZ 出力



(b) CS-RZ 出力

図 16 20GHz 2 通倍出力の光スペクトル

<引用文献>

- [1] M. Nakazawa, T. Yamamoto, and K. R. Tamura, "1.28 Tbit/s-70 km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 24, p.2027, 2000.
- [2] 宮下、戸田、"遅延干渉計の安定化による光パルス間位相の制御," 信学ソ大、B-10-18、2007.
- [3] 宮下、足立、戸田、"安定化した遅延干渉計による RZ 光クロックの 4 通倍光時分割多重回路," 信学総大、B-10-72、2008.
- [4] J. Miyashita, Y. Adachi, and H. Toda, "An Optical Time-Division Multiplier for RZ Optical Clock by means of Stabilized Delay Interferometers," *Progress In Electromagnetics Research Symposium*

- (PIERS 2009), 3P4-10, Beijing (Mar. 2009).
- [5] 藤井、村井、"液晶による OTDM 信号の波高値等化/搬送波位相差制御技術の検討," 信学ソ大、B-10-63、2006.
- [6] T. Shimizu, Y. Murata, M. Tanimura, M. Nagao, K. Inafune, M. Kagawa, H. Murai, and H. Toda, "Active bit-wise phase stabilization in 80 Gbit/s RZ/CS-RZ OTDM multiplexer," 15th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2010), 9B3-4, Sapporo, July 2010.
- [7] M. Nagao, T. Shimizu, M. Tanimura, Y. Murata, K. Inafune, M. Kagawa, H. Murai, and H. Toda, "Active bit-wise phase stabilization in 160 Gbit/s RZ/CS-RZ OTDM multiplexer," to be presented at Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP2010), Shanghai, Dec. 2010.
- [8] 五十嵐、加藤、菊池、"315-MHz FSR を有する偏波保持ファイバ型マッハツェンダー干渉計フィルタ," 信学総大、B-10-72, 2009.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 8 件)

- [1] P. Buechler, K. Sugiyama, and H. Toda, "Optimization of an optical bandpass filter on a stabilized quadruple OTDM multiplier for RZ/CS-RZ optical clock," International Topical Meeting on Microwave Photonics / Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (MWP/APMP 2014), TuEG-11, Sapporo (Oct. 2014).
- [2] P. Buechler, K. Sugiyama, and H. Toda, "隣接光パルス間位相を安定化した RZ/CS-RZ 光クロック 4 通倍回路における所要光フィルタの特性," 電子情報通信学会技術研究報告、MWP2014-32、室蘭工業大学 (室蘭市) (2014 年 7 月).
- [3] P. Buechler, M. Otsuki, and H. Toda, "Influence of slope of optical bandpass filter on a stabilized quadruple OTDM multiplier for RZ/CS-RZ optical clock," 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'13), PII-DC-1, Taipei (Sept. 2013).
- [4] Pierre Buechler、大槻雅人、戸田裕之、"Influence of slope of flat-top optical bandpass filter on a stabilized quadruple OTDM multiplier for RZ/CS-RZ optical clock," 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、18a-A8-5、同志社大学 (京田辺市) (2013 年 9 月).
- [5] P. Buechler, M. Otsuki, and H. Toda, "A phase stabilized quadruple OTDM multiplier for RZ/CS-RZ optical clock with a flat-top optical bandpass filter," 電子情報通信学会技術研究報告、MWP2013-30、

稚内総合文化センター (稚内市) (2013 年 7 月).

- [6] 戸田裕之、大槻雅人、"RZ/CS-RZ 光クロック通倍回路における隣接光パルス間位相の安定化," レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会、29aIV-4、姫路商工会議所 (姫路市) (2013 年 1 月).
- [7] M. Otsuki, R. Takama, and H. Toda, "A phase stabilized quadruple OTDM multiplier for RZ/CS-RZ optical clock with an optical bandpass filter," Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2012), AS3G.4, Guangzhou (Nov. 2012).
- [8] 大槻雅人、高間蓮成、戸田裕之、"隣接光パルス間位相を安定化した RZ/CS-RZ 光クロック 4 通倍回路 ~ 光フィルタの利用 ~," 電子情報通信学会技術研究報告、MWP2012-38、北海道大学 (札幌市) (2012 年 7 月).

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：光時分割多重化回路
 発明者：戸田裕之、五十嵐浩司、菊池和朗
 権利者：同上
 種類：特許
 番号：特開 2012-134898
 取得年月日：平成 24 年 7 月 12 日
 国内外の別：国内

○取得状況 (計 1 件)

名称：光時分割多重化方法および装置
 発明者：戸田裕之
 権利者：同上
 種類：特許
 番号：第 5152789 号
 取得年月日：平成 24 年 12 月 14 日
 国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

戸田 裕之 (TODA, Hiroyuki)
 同志社大学・理工学部・教授
 研究者番号：00202200

(2)研究協力者

高間 蓮成 (TAKAMA, Renjo)
 大槻 雅人 (OTSUKI, Masato)
 杉山 清敬 (SUGIYAMA, Kiyotaka)
 ブチュレル ピエール (BUECHLER, Pierre)