

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02803

研究課題名(和文)電気光学変調器ベース光周波数コムを用いた超高精度周波数変換技術の創出

研究課題名(英文)Ultra-high precision frequency conversion using an electro-optic-modulation comb

研究代表者

石澤 淳(Ishizawa, Atsushi)

日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員

研究者番号：30393797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：連続発振半導体レーザーを電気光学変調器に通して25 GHz 間隔の光周波数コムを発生させ、その光周波数コムの周波数揺らぎを示すキャリアエンベロープオフセット(CEO)周波数を検出することに成功し、通信波長帯光周波数コムの周波数安定化を実現した。CEO周波数信号には光周波数コムを駆動するマイクロ波(25 GHz)信号発生器の雑音情報が増幅されて転写されている。そこで、このCEO信号を外部基準信号と比較して雑音を減らすようにマイクロ波信号発生器にフィードバック制御することによって、低ノイズなマイクロ波発生に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、金融・証券分野における高頻度取引、エネルギー分野におけるスマートグリッドの蓄給電タイミング合わせ、IoT、及び、高度交通システムの自動運転補助に高精度な時刻同期が期待されている。将来、高精度な時刻を光で送信することが検討されている。しかし、現在の通信機器は正確な時刻を光ではなくマイクロ波を受信して動作している。将来、正確な時刻を光で送信する際に我々が開発する光周波数コムが光からマイクロ波に正確な時刻を変換する技術になり得る。

研究成果の概要(英文)：We have demonstrated a carrier-envelope-offset (CEO)-locked electro-optics-modulation (EO) comb with 25-GHz mode spacing at telecommunications wavelengths using a continuous wave laser as a seed light source. Noise information of the microwave signal generator at 25 GHz driving the EO comb is amplified and transferred to the CEO frequency signals. Using carrier-envelope-offset signal of a 25-GHz electro-optics-modulation comb, we have demonstrated a record phase-noise reduction of a conventional signal generator.

研究分野：レーザー工学

キーワード：光周波数コム 電気光学変調 位相雑音 スーパーコンティニウム光 マイクロ波 ミリ波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレットの爆発的な普及により、移動通信へのトラフィック(通信量)は2020年までには1,000倍になると言われている。昨今の高度情報化社会の急激な進展は我々の予想を遙かに超えたレベルで進行しつつある。そこで、第5世代の移動体通信では30 GHz帯のミリ波を用い、現行の100倍に当たる10 Gbpsの通信速度の実現を目指し、高精細な映像や大容量の情報を超高速で伝送することを目指している。しかしながら、市販のマイクロ波・ミリ波の発生装置は、水晶発振器(基本周波数10 MHz)として知られる発振器の周波数を整数倍して、必要とする周波数を発生させる方法を取っているため、雑音も増加する。例えば、1 GHzのマイクロ波を発生させる場合は、10 MHzの水晶発振器で発生する雑音が10,000倍に拡大されてしまう。米国NISTは超低膨張ガラス共振器ベースの超狭線幅連続波レーザーを用いてモード同期(ML)チタンサファイアレーザーの繰返し周波数を安定化し、超低雑音なマイクロ波(10 GHz)の発生に成功した。しかし、低雑音なマイクロ波信号の周波数は固定で、しかも大規模な装置が必要となるため、今後はより簡便で周波数可変な低雑音マイクロ波・ミリ波信号発生が普及の鍵となる。我々はその目標を実現するために電気光学(EO)変調器ベース光コム(E0コム)に着目した。光コムのレーザー光源はMLチタンサファイアレーザー、エルビウム添加MLファイバーレーザー、マイクロ光コム、E0コム等がある。世の中に広く普及している一般的な方法であるMLコムは、光共振器を用いるため、繰返し周波数は低く100 MHz程度でほぼ固定である。一方、E0コムは、繰返しパルス列の発生に光共振器を用いないために共振器長の制限を受けず、数十GHzの高繰返しかつ繰返し可変のパルス列の発生が容易に実現できるが、中心波長から離れるに従って、雑音が拡大され、スペクトル幅が大きくなるという問題点があった(図1)。

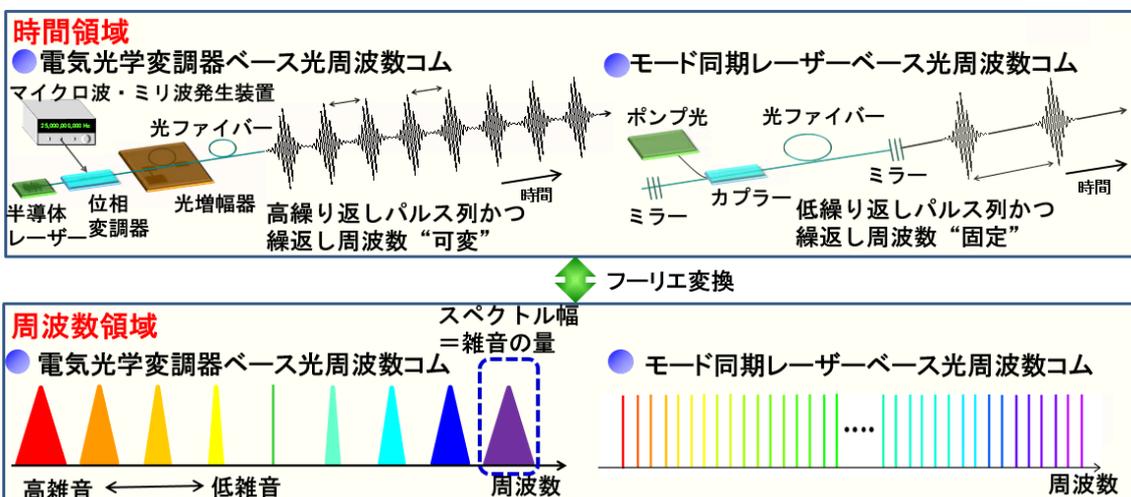


図1 時間・周波数領域でのレーザーパルス

2. 研究の目的

本研究のアイデアは、この問題点を逆に利用して雑音の高感度な検出器として活かすものである。先の原理実証実験では、従来問題点と捉えられていた、この雑音拡大の性質を高感度な雑音検出器として利用し、マイクロ・ミリ波信号発生器へフィードバック制御することで、従来よりも雑音が2桁低い周波数可変なマイクロ・ミリ波の発生が可能であることを達成した。しかし、この方法は狭線幅な参照レーザーが必要であった。そこで、E0コムのキャリアエンベロップオフセット(CEO)信号を利用することで参照レーザーが不要になる簡便さと雑音の大幅低減を同時に実現可能な新規手法を提案し、超低雑音なマイクロ・ミリ波発生を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

図2に我々が提案する光変調器を用いた25 GHzモード間隔E0コムの構成およびE0コムを用いた低雑音なマイクロ・ミリ波発生方法を示す。マイクロ・ミリ波発生装置を用いて、E0変調器を駆動し、E0コムを発生させる。CW半導体レーザー(中心波長1542 nm)や線幅1 Hzレーザーを種光源にし、信号発生器から出力される25 GHz正弦波で駆動した位相・強度変調器で38 nmのスペクトル幅を持つ平坦な25 GHzモード間隔の光コムを発生させる。シングルモードファイバーに通して分散を付与し、チャープ補償することで短パルス化する。フィルターキャビティを用いてASE成分を除去した後、光ゲート(パルスピッカー)を導入し、繰返し周波数を1.25 GHzまで低減した後にエルビウム添加ファイバー増幅器で平均1 Wにまで増幅し、長さ1 mのガラスブロックに通して分散を与えてチャープ補償することにより、パルス幅150 fsの短光パルス発生を行った。続いて、その短光パルスを高非線形ファイバーもしくはフォトニック結晶ファイバー等の高非線形材料へ光結合し、2/3オクターブ帯域以上の超広帯域光を発生させる。これにより、マイクロ・ミリ波発生装置の雑音を光領域に転写し拡大することができる。2f-3f自己参照干渉法により2/3オクターブ帯域の長短波長成分を干渉させることによってCEO周波数を抽出する。このCEO信号として電気信号に変換することでマイクロ・ミリ波発生装置の雑音を高

感度に検出する。これは種光源から離れたモード間の干渉信号である為、信号発生器の雑音が増大され、高感度な雑音検出器として用いることで従来よりも低ノイズなマイクロ・ミリ波発生が可能であると考えられる。マイクロ・ミリ波発生装置へフィードバック制御し、低雑音なマイクロ・ミリ波発生が発生する。

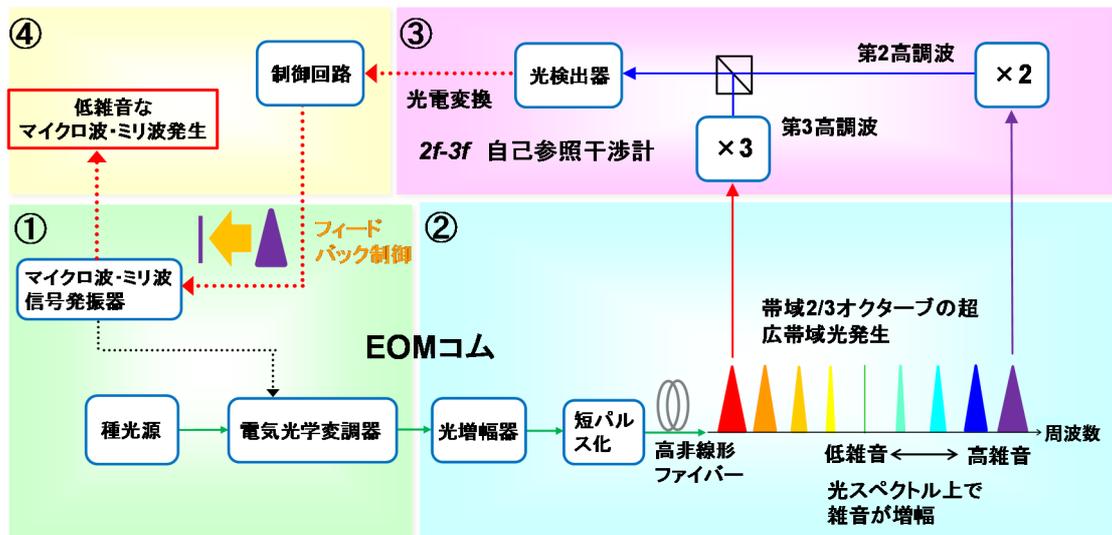


図2 マイクロ・ミリ波信号発生装置の雑音低減

4. 研究成果

図2のステップにおいて、偏波保持分散フラットフォトニック結晶ファイバー(PCF)を用いた。このPCFは通常のシングルモードファイバーと比較して10倍も高い非線形性をもつ。ステップで142フェムト秒(フェムト: 10^{-15})まで短パルス化した平均出力1W、1.25GHz繰り返しのEOコムをPCFへ入力して2/3オクターブ帯域以上の超広帯域光発生に成功した(図3)。

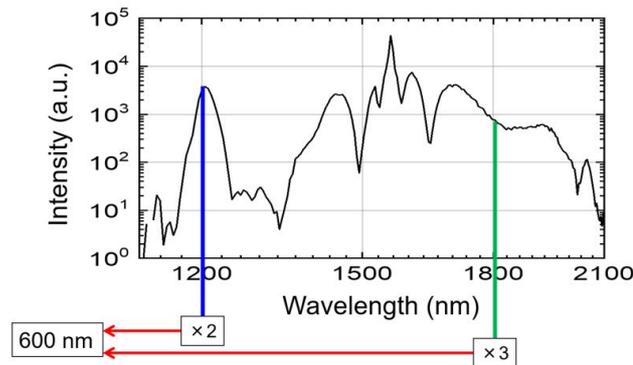


図3 偏波保持分散フラットPCFからの射出スペクトル

EOコムは繰り返し周波数が高く、パルスエネルギーが低いから、オクターブ帯域光発生が困難であることから、2/3オクターブ帯域光を用いた $2f-3f$ 自己参照干渉計に着目した。この $2f-3f$ 自己参照干渉計は、2/3オクターブ帯域のスペクトル拡大でCEO周波数 f_{CEO} を検出できる利点があるが、2次および3次の非線形過程を用いるため、高効率な非線形波長変換が要求される。第2および

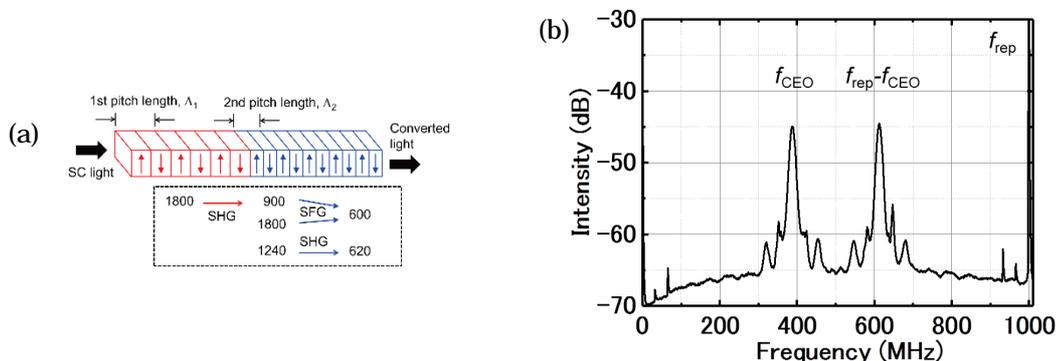


図4 (a) デュアルピッチPPLN導波路、(b)EOコムのCEO周波数

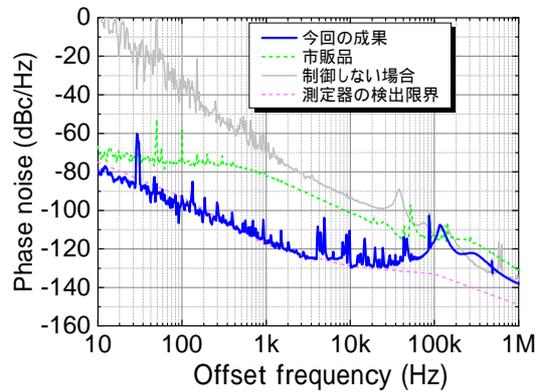


図5 25 GHz 信号のノイズスペクトル

チ長で構成させるデュアルピッチ PPLN リッジ導波路(DP-PPLN)を作製した[図 4(a)]。実験は、偏波保持分散フラット PCF を用いた 2/3 オクターブ帯域以上の超広帯域光を DP-PPLN に入射し、CEO 周波数を検出した[図 4(b)]。DP-PPLN では、前段で 1800 nm の第二高調波(900 nm)、後段で 900 nm と 1800 nm の和周波(600 nm)が発生するが、後段のピッチでは 1240 nm の第二高調波(620 nm)も同時に発生する[図 4(a)枠内]。光検出器の出力を RF スペクトルアナライザで調べたところ、線幅@-3dB が約 1 MHz、信号対雑音比で約 20 dB の CEO 周波数を検出した。CEO 信号の線幅が肥大化している要因は強度雑音でなく、位相変動量が大きいことに起因していることその為、CEO 周波数を 16 分周することで、CEO 信号の線幅@-3dB を約 100 kHz まで狭窄化でき、信号対雑音比も 30 dB 以上に増大した。ステップ で PLL 回路を用いて、この 16 分周した CEO 周波数を GPS 衛星からの信号と同期した RF 基準信号と位相比較してマイクロ・ミリ波信号発生装置をフィードバック制御することにより、市販のノイズ測定器で検出できる限界以下まで超低ノイズなマイクロ・ミリ波発生に成功した(図 5)。以上の研究開発より、EO コムの CEO 信号を利用することで参照レーザーが不要になる簡便さと極低雑音なマイクロ・ミリ波発生の実証を行うことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hitachi K., Someya M., Ishizawa A., Nishikawa T., Gotoh H.	4. 巻 113
2. 論文標題 Characterization of longitudinal acoustic phonons in InGaAsP multiple quantum wells by asynchronous optical sampling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 201102 ~ 201102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5041475	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishizawa Atsushi, Goto Takahiro, Kou Rai, Tsuchizawa Tai, Matsuda Nobuyuki, Hitachi Kenichi, Nishikawa Tadashi, Yamada Koji, Sogawa Tetsuomi, Gotoh Hideki	4. 巻 111
2. 論文標題 Octave-spanning supercontinuum generation at telecommunications wavelengths in a precisely dispersion- and length-controlled silicon-wire waveguide with a double taper structure	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 021105 ~ 021105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1063/1.4992112	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hitachi K., Hara K., Tadanaga O., Ishizawa A., Nishikawa T., Gotoh H.	4. 巻 110
2. 論文標題 Reduced pulse energy for frequency comb offset stabilization with a dual-pitch periodically poled lithium niobate ridge waveguide	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 241107 ~ 241107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1063/1.4986444	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 石澤 淳、西川 正、日達研一、後藤秀樹	4. 巻 46
2. 論文標題 電気光学変調光コムを用いた超高精度周波数変換技術	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 80 ~ 85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石澤 淳、西川 正、日達研一、後藤秀樹	4. 巻 29
2. 論文標題 電気光学変調光コムを用いた低雑音マイクロ・ミリ波発生法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の頁 12~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 A. Ishizawa, T. Nishikawa, K. Hara, K. Hitachi, T. Sogawa, and H. Gotoh
2. 発表標題 Carrier-envelope-offset locking of 25-GHz EOM comb based on a free-running CW Laser Diode
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenya Hitomi, Atsushi Ishizawa, Kenichi Hitachi, Tadashi Nishikawa, Hideki Gotoh, Tetsuomi Sogawa, and Kazutaka Hara
2. 発表標題 Simple method to lock an optical frequency comb to an ultra-stable laser without an RF signal generator
3. 学会等名 Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenichi Hitachi, Mayu Someya, Atsushi Ishizawa, Tadashi Nishikawa, Hideki Gotoh
2. 発表標題 Characterization of Acoustic Phonons in InGaAsP MQW by Asynchronous Optical Sampling
3. 学会等名 Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Ishizawa, T. Nishikawa, K. Hitachi, and H. Gotoh
2. 発表標題 Generation of ultralow-phase-noise millimeter-wave signal using an electro-optics-modulation comb
3. 学会等名 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大原憲, 宇田祥平, 石澤淳, 日達研一, Nathalie Picque, Theodor Haensch, 西川 正
2. 発表標題 デュアル EOMコム 分光における 25GHz モード間隔の自動補間法
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 人見 賢弥、石澤 淳、日達 研一、西川 正、後藤 秀樹
2. 発表標題 電気光学変調コムのCEO信号の高SNR検出
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 校條 健太、日達 研一、石澤 淳、西川 正、後藤 秀樹
2. 発表標題 InP/InGaAsP量子井戸における音響フォノン周波数シフトの観測
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Ishizawa
2. 発表標題 Electro-optics-modulation (EOM) combs
3. 学会等名 KEIO symposium on microresonator frequency comb (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石澤 淳
2. 発表標題 電気光学変調コムを用いた高精度周波数変換
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日達 研一
2. 発表標題 デュアルピッチ PPLN 導波路を用いた光コム周波数安定化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hitachi, K. Hara, O. Tadanaga, A. Ishizawa, T. Nishikawa, and H. Gotoh
2. 発表標題 Reduced Pulse Energy for Frequency Stabilization with a Dual-Pitch Periodically Poled Lithium Niobate Ridge Waveguide
3. 学会等名 CLEO/Europe-EQEC 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Hara, K. Hitachi, A. Ishizawa, T. Nishikawa, and H. Gotoh
2. 発表標題 Evaluation of 2f-to-3f self-referencing interferometer using dual-pitch PPLN ridge waveguides
3. 学会等名 ISNTT2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石澤 淳
2. 発表標題 電気光学変調コムを用いた高精度光周波数変換技術
3. 学会等名 超高速光エレクトロニクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石澤 淳
2. 発表標題 電気光学変調光コムを用いた超高精度光周波数変換技術
3. 学会等名 光ネットワーク産業技術研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石澤 淳、西川 正、日達研一、原 一鳳、寒川哲臣、後藤秀樹
2. 発表標題 電気光学変調器ベース光コムのキャリアエンベロープオフセットロック
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 日達研一、石澤 淳、西川 正、後藤秀樹
2. 発表標題 非同期光サンプリング法を用いたInAsP/InGaAsP量子井戸におけるキャリア緩和時間測定
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 原 一鳳、石澤 淳、日達研一、西川 正、寒川哲臣、後藤秀樹
2. 発表標題 電気光学変調器ベース光コムを用いた新しい低雑音ミリ波発生法
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 原 一鳳、石澤 淳、日達 研一、西川 正、寒川 哲臣、後藤 秀樹
2. 発表標題 電気光学変調を用いた高精度光周波数計測法
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 染谷真由、日達研一、石澤 淳、西川 正、後藤秀樹
2. 発表標題 非同期光サンプリング法によるInP/InGaAsP量子井戸の音響フォノン振動測定
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原 一鳳、石澤 淳、日達研一、西川 正、寒川哲臣、後藤秀樹
2. 発表標題 電気光学変調光コムを用いた新しい低雑音マイクロ波発生
3. 学会等名 レーザー学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 人見賢弥、石澤 淳、原 一鳳、日達研一、西川 正、寒川哲臣、後藤秀樹
2. 発表標題 外部基準信号を用いないキャリアエンベロープオフセット周波数安定化
3. 学会等名 レーザー学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宇田祥平、大原 憲、石澤 淳、日達研一、西川 正
2. 発表標題 デュアル電気光学変調コム分光法によるアセチレン吸収線スペクトル測定
3. 学会等名 レーザー学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 光周波数計測装置	発明者 石澤淳、日達研一、 西川正、原一鳳	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-190682	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 信号発生器および信号発生方法	発明者 石澤淳、日達研一、 西川正	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-160018	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光周波数コム安定化装置	発明者 石澤淳、日達研一、 西川正、人見賢弥、 原一鳳	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-008591	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光周波数計測装置	発明者 石澤淳、日達研一、 西川正、原一鳳	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-036202	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	西川 正 (Nishikawa Tadashi) (20374069)	東京電機大学・工学部・教授 (32657)	
研究分担者	日達 研一 (Hitachi Kenichi) (60564276)	日本電信電話株式会社N T T物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員 (92704)	
研究分担者	赤塚 友哉 (Akatsuka Tomoya) (90548257)	日本電信電話株式会社N T T物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員 (92704)	
研究分担者	小栗 克弥 (Oguri Katsuya) (10374068)	日本電信電話株式会社N T T物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主幹研究員 (92704)	
研究分担者	増子 拓紀 (Mashiko Hiroki) (60649664)	日本電信電話株式会社N T T物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・特別研究員 (92704)	
研究分担者	今井 弘光 (Imai Hiromitsu) (00649551)	日本電信電話株式会社N T T物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・研究主任 (92704)	