

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686014

研究課題名(和文)超高速ホログラフィック光周波数コム合成法の研究

研究課題名(英文)Study of ultrafast holographic optical frequency comb synthesizer

研究代表者

塩田 達俊 (SHIODA, Tatsutoshi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10376858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,100,000円、(間接経費) 6,330,000円

研究成果の概要(和文)：フェムト秒時間分解能で光波形の制御と計測を実現するために、新たな光信号処理と計測技術を考案した。ピーク間隔100ギガヘルツ以上の光周波数コムを生成し、そのピーク毎の振幅・位相を制御できる光回路を構築した。また、複数のピーク間の位相スペクトルを測定できる二波長同時ヘテロダイン検波法を考案した。これらの制御系と計測系を融合すると、フェムト秒時間領域での任意光波形を周波数領域で制御することが可能になる。これをフェムト秒光周波数コム合成・解析法とし、光周波数コムの振幅・位相スペクトルの制御を行い、フェムト秒からピコ秒領域の超高速任意光波形の発生と計測に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have proposed an ultrafast optical arbitrary waveform synthesizer and analyzer in femtosecond and picosecond time region. Ultrafast waveforms were generated by manipulating the amplitude and phase of a gigahertz optical frequency comb (OFC) using a customized colorless optical synthesizer. The synthesized waveform was analyzed on the frequency axis using a dual-heterodyne mixing. The proposed system has been applied to generate femtosecond pulses and to synthesize composite amplitude-shift and phase-shift keying signals.

研究分野：光学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：応用物理学・工学基礎 計測工学 先導的通信

1. 研究開始当初の背景

近年、クラウドコンピューティングやインターネットビデオなどの新たなサービスの普及により通信トラフィックが急激に増加し、経産省の予測では 2025 年までに現状の 190 倍の情報流通量に膨れ上がると予想されている。伝送容量を拡大するためにコアネットワークへの 40Gbps 光ネットワークの導入が活発化しており、さらに次世代の 100Gbps 光ネットワークの実用化に向けた研究開発も盛んになっている。

40Gbps、100Gbps の光伝送では、伝送路で生じる信号劣化、雑音の影響を大きく受けるため、従来の光強度を ON/OFF する 2 値変調方式ではなく位相変調を用いた多値変調方式やデジタルコヒーレント方式が導入され始めており、次世代のネットワーク方式として期待されている。

一方、デバイスの動作速度の制約から、光変調技術は 100Gbps オーダーで飽和するとされている。現状の 190 倍という飛躍的な通信トラフィックの増加を担う将来の技術には、少なくともデバイス的高速化を望むのは困難な状況にあり、単にデバイスで決まる最速の変調速度に多値変調方式を組合せる考え方では近い将来限界を迎えるであろう。従って、デバイス開発に頼るのではなく、全く新しい方式で高速波形を生成・検出できる技術の開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、テラビット領域の光情報伝送用のデジタル信号波形を発生・計測できる新規なフーリエ空間光変調システムを設計・試作して実証することである。具体的には、独自の手法で発生した光周波数コム(周波数間隔 100GHz、帯域 10THz 以上)を種光として、デジタルホログラフィー技術による光電界スペクトルの制御により ASK 方式や PSK 方式で任意デジタル波形を発生し、さらに申請者が開発したリアルタイムな位相差スペクトルの計測法を用いた超高速光電界波形計測システムを確立して、上記波形の計測・復調を実証することで将来の超高速光電界制御技術の礎を築く。

3. 研究の方法

初年度は、要素技術として波形発生技術を構築した。(フーリエ空間光変調デバイスの試作・動作)

(1) 200GHz 光周波数コムの同期発生

25G 光周波数コム(256 波)をシード光とする 2 種類の 200GHz 光周波数コムを光合分波回路の周回性を利用して同時に発生した。

シード光として、25GHz 間隔で 6.4THz (256 波)以上の帯域を持つ光周波数コムを発生した。その際、光増幅器によるゲインを周波数帯域全体に渡って効率よく得るために中心波長を 1550nm とした。発生した光周波数コムを光合分波回路(AWG)によりフーリエ空間へ展開し、200GHz 光周波数コムを発生した。光周波数コムをそれぞれ電界制御して光

振幅と位相を制御できることを確認した。

(2) 64ch 変調器によるフーリエ空間電界変調 4 つの 100GHz 光周波数コム(64 波)の縦モード(計 256 波)を並列に振幅・位相変調する。各 200GHz 光周波数コムの縦モードの電界をそれぞれ変調して、光位相と光振幅を独立に制御できることを示した。

(3) 1 台毎の 64ch 変調器出力の電界計測モード間位相・振幅スペクトルを 2 波長ずつ計測し、変調状態を検査した。

多波長電界ヘテロダイン検波法の参照光を光強度変調器の 2 逓倍駆動で得られる 2 波とした光電界計測システムを構築し、出力される位相スペクトルの評価と制御信号へのフィードバックを確認した。

2 年目は、フーリエ空間光検出回路の試作・動作を行った。

(1) 64ch のフーリエ空間電界検出回路を試作した。電界計測用の光導波回路を試作し、400GHz 光周波数コム(5 波)の平行計測技術を確立した。実際にフーリエ空間光検出回路を試作し、フーリエ空間展開デバイス(AWG)と、振幅・位相スペクトル検出回路で構成し分波してそれぞれ多波長電界ヘテロダイン検波法により計測した。

(2) 1.6T 帯域で、ASK 信号を計測した。電界変調された 100GHz 光周波数コムを試作した電界検出回路で同時に変調し、フーリエ空間光変調とフーリエ空間光計測の並列処理用の光導波回路を 1 台ずつ(64 波)による実証試験を行い、450fs のパルス幅で 2Tbit/s、4bit パケットを任意波形として生成し、計測することに成功した。

(3) 46 ps~56 ps の範囲で 100 fs ごとに 100 区間に分割し、各区間をフーリエ変換した。フーリエ変換する区間以外は振幅 0 として 46 ps~56 ps の範囲で計算した。フーリエ変換して得られた振幅・位相スペクトルを時間周波数軸上にマッピングした結果から中心付近を拡大しピークとなる周波数をプロットして可視化した。同一周波数(194.6635 THz)の位相・振幅を抽出し、時間軸上にプロットした結果から振幅のピークとなる周波数は、特に各パルスの内部でほとんど変化がなく、チャープの影響を受けていないことが推測された。また、特に中央のパルス内部では位相がほぼ変化せずチャープの影響がないことおよび振幅の 0 となる点での位相のとびなどの時間的な位相変化の様子が読み取れた。

3 年目は、さらに次の様な波形発生技術を構築した。

(1) 200GHz 光周波数コムの同期発生

25G 光周波数コム(256 波)をシード光とする 2 種類の 200GHz 光周波数コムを光合分波回路の周回性を利用して同時に発生した。

シード光として、25GHz 間隔で 6.4THz (256 波)以上の帯域を持つ光周波数コムを発生した。その際、光増幅器によるゲインを周波数帯域全体に渡って効率よく得るために中心波長を 1550nm とした。発生した光周波数コ

ムを光合分波回路(AWG)によりフーリエ空間へ展開し、200GHz 光周波数コムを発生した。光周波数コムをそれぞれ電界制御して光振幅と位相を制御できることを確認した。

(2) 64ch 変調器によるフーリエ空間電界変調 4 つの 100GHz 光周波数コム(64 波)の縦モード(計 256 波)を並列に振幅・位相変調する。各 200GHz 光周波数コムの縦モードの電界をそれぞれ変調して、光位相と光振幅を独立に制御できることを示した。

(3) 1 台毎の 64ch 変調器出力の電界計測モード間位相・振幅スペクトルを 2 波長ずつ計測し、変調状態を検査した。

多波長電界ヘテロダイン検波法の参照光を光強度変調器の 2 通倍駆動で得られる 2 波とした光電界計測システムを構築し、出力される位相スペクトルの評価と制御信号へのフィードバックを確認した。

4. 研究成果

(1) 高速パルスの内部位相解析への応用について、実験は全て共振器内に変調器を設置した構造をもつ光周波数コム光源を用いた。ここでは、同光周波数コム光源の振幅・位相スペクトル計測を行って時間波形を得て、さらに計測した光波形が光電界として多くの情報をもつことから、その情報を振幅・位相の時間変化として取り出すための手法も合わせて報告する。

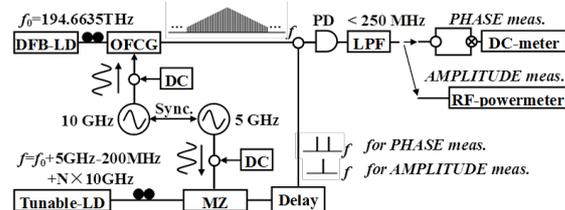


Fig.1 Experimental setup.

Fig.1 に実験系を示す。半導体レーザー (DFB-LD)を種光源として、周波数が 10 GHz のマイクロ波信号で駆動した光周波数コム発生器 (OFCG) により、3 dB 幅が 220 GHz となる 10 GHz 間隔の信号用の光周波数コムを発生した。一方、参照光源には波長可変レーザーを用い、その光周波数を信号の光周波数コムの計測する 2 波の縦モードの中間周波数に対して約 200 MHz 程度ずれる様に設定した。その出力を 5 GHz のマイクロ波信号で駆動した光強度変調器 (MZ) に入射した。ここで 5GHz のマイクロ波は、光周波数コムを駆動する 10GHz マイクロ波の信号発生器と同期した。また、直流電源の電圧を制御して光強度変調器を 2 通倍駆動して 10 GHz 間隔の二波長のピークを発生して参照光とした。この時得られる 2 波の位相差 π を位相計測の基準とした。信号光となる光周波数と 2 波長の参照光を合波して、フォトダイオード (PD) でヘテロダイン検波し、250 MHz のローパスフィルタで必要な信号のみを抽出した後に分波と乗算器をとおして直流電圧を測定した。ここで、観測する直流電圧は光路

長の関数であるので、光路長をディレイラインにより物理的に走査して得られる正弦波波形の位相を $\Delta\phi$ とした。また、波長可変レーザーの出力を参照光としたヘテロダイン検波により振幅スペクトルを得た。光周波数コムの中心周波数から ± 1 THz (± 100 次)の帯域内で縦モードの振幅/位相スペクトルを測定し、計算機上で波形を重ね合わせて測定結果を得た。

光スペクトラムアナライザ(OSA)で観測した信号光として発生した光周波数コムと一部を拡大したスペクトルを Fig.2 に示す。また、計測した振幅と位相スペクトルを Fig.3 に示す。さらに、Fig.2 から計算した時間波形と、それを自乗した光強度波形をそれぞれ Fig.4 と Fig.5 に示す。位相変調の特性に近い 50ps と 100ps の時間間隔でパルスが見られることがわかる。

Fig.4 の計測結果のうち 46ps から 50ps のパルスを含む 10ps の時間領域を 100 分割してそれぞれの分割区間をフーリエ変換すると、振幅・位相スペクトルを時間周波数軸上にマッピングした Fig.6 a) (振幅トレース)、Fig.6 b) (位相トレース) が得られた。ここで、フ

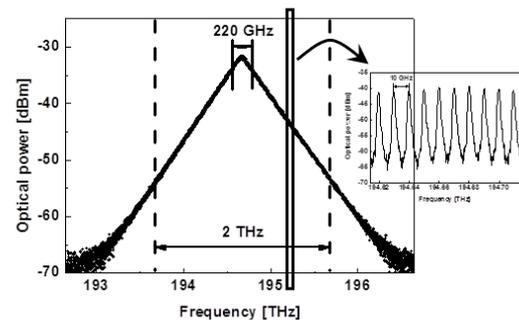


Fig. 2 Optical frequency comb spectrum measured by an optical spectrum analyzer. The expanded spectrum was measured with 2 GHz resolution.

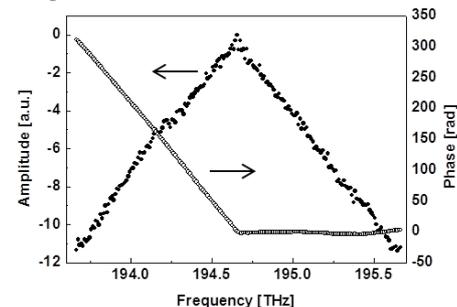


Fig. 3 Amplitude and phase spectra of optical frequency comb measured by dual-heterodyne mixing.

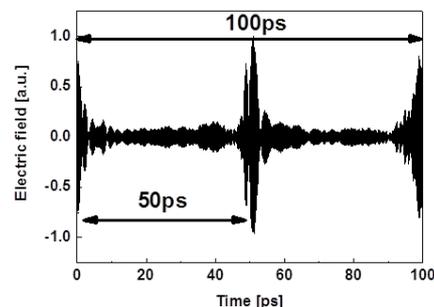


Fig. 4 Experimentally observed electric-field waveform.

ーリエ変換する区間以外は振幅0とおき、群遅延の影響を除くため51 psを中心に位相を補正した。振幅トレースではパルスがスプリットしている様子があった。位相トレースではパルスがある領域で比較的平坦な位相である様子を見てとれる。Fig.7は、Fig.6 a)の振幅トレースについて周波数軸上の中心周波数近傍を拡大し、各時間区間における振幅となる周波数を同時に表した図である。振幅が最大となる周波数は、スプリットした各パルスの内部でほとんど変化がないことが分かる。振幅が小さくなる部分ではわずかな変動が見られるが、チャープの影響が小さいことが推測できる。Fig.8は、Fig.6のほぼ中心周波数である194.6635 THz上の振幅と位相を時間に対してプロットした時間プロファイルである。パルス内部では位相がほぼ変化せずチャープの影響が少ないことが読み取れる。

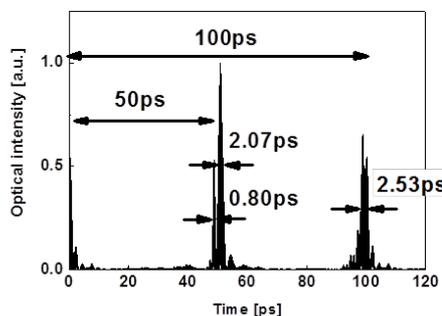
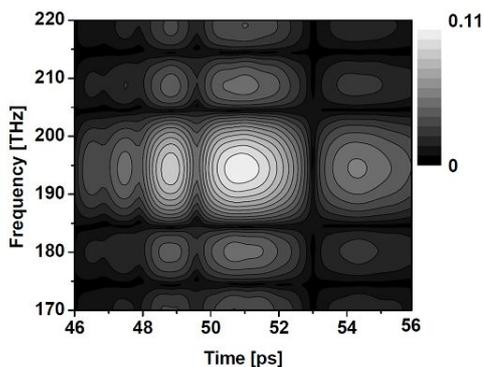
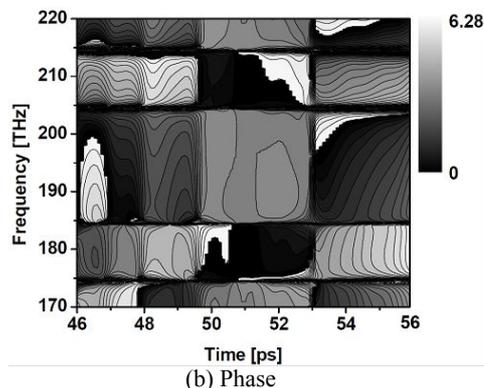


Fig. 5 Intensity waveform.



(a) Amplitude



(b) Phase

Fig. 6 Dual-heterodyne mixing trace of (a) amplitude and (b) phase spectral evolution.

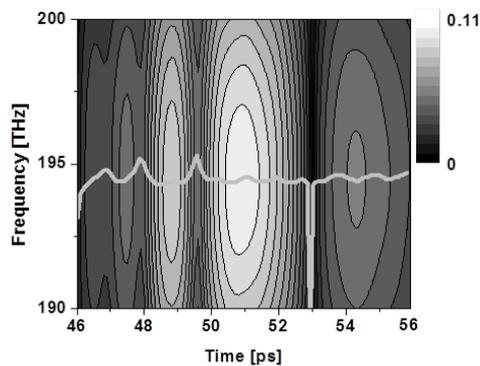


Fig. 7 Dual-heterodyne mixing trace of expanded amplitude evolution with a locus of the zeniths in spectral sections.

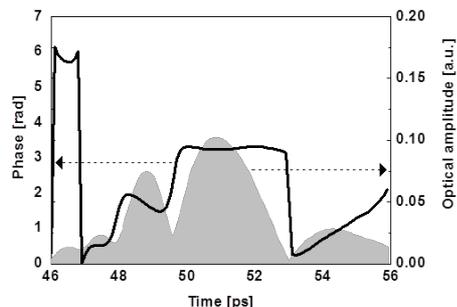


Fig. 8 Intensity and phase evolution at center frequency of 194.6635 THz.

(2)テラビットデジタル光信号制御への応用
前項で明らかにした光周波数コムの特長を元にして、光周波数コム縦モードの振幅と位相を制御し計測することで任意波形制御を目指した結果を本項では紹介する。ここでは、200GHzの高速な光周波数コムを生成し、制御する縦モードを32波(帯域6.4THz)としてデジタル信号波形制御を試みた。また、位相スペクトルを並列計測するために、受光側においてもAWGを用い、二波長同時ヘテロダイン検波を空間的に並列にかつ同時に計測できる光回路を構築した。実験系をFig.9に示す。約200MHz異なる光周波数を発振する2台の単一周波数レーザー光をそれぞれ信号と参照の種光として光周波数コムを発生した。同一のマイクロ波信号発生器から発生した25GHzのマイクロ波で2台のOFCGを駆動して光周波数コムを発生した。発生した25GHz光周波数コムのうち信号光はFSRが200GHzのカラースレスAWG(AWG1)に入射し、200GHz間隔の光周波数コムを発生した。AWG1に入射した光周波数コムと出射した光周波数コムをFig.10 a)、b)にそれぞれ示す。得られた光周波数コムは、Fig.10 b)の様に200GHz間

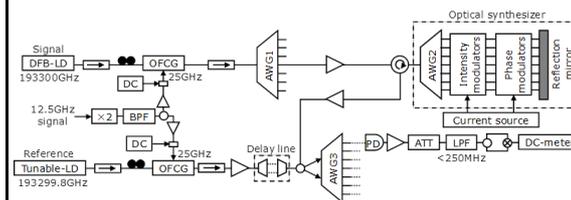


Fig. 9 Experimental setup.

隔に32波の縦モードが6.4 THz帯域で得られた。これを光シンセサイザに入射して、32チャンネルで強度と位相を独立に変調して制御した。ここで、シンセサイザ内に集積されたAWG(AWG2)のチャンネル間隔は200 GHzとした。二波長同時ヘテロダイン検波による検出では、25GHzチャンネル間隔のAWG(AWG3)の200GHzずれた二つの入力ポートに信号と参照光を合波して入力し、信号と参照を合わせたスペクトルの出力の組み合わせを波長ごとに各ポートから得た。光シンセサイザの制御信号を決定するために、得たいデジタル信号の波形をコンピュータ上で作成し、フーリエ変換により算出した強度・位相スペクトルが得られる様に、振幅と位相スペクトルの出力をもとにして光シンセサイザの多チャンネルの電流源により設定した。デモンストレーションとして、発生する波形を3.2 Tbit/s 16 bit 信号の3種類の packets パターン

- (a) 「1000000000000000」
- (b) 「1000100000100000」
- (c) 「1011001110011110」とした。

Fig.11に3種類の packets パターンについて、振幅スペクトルと位相スペクトルの測定結果と計算で得た理論的な予想を示す。実験結果と計算結果は全体には近い傾向が得られた。また、Fig.11の周波数毎に実験で得られた振幅と位相から得られる正弦波を全て重ね合わせて、光パワーを導出した結果をFig.12に示す。時間領域でも、実験結果と計算結果の間には近い形状の波形を得られた。

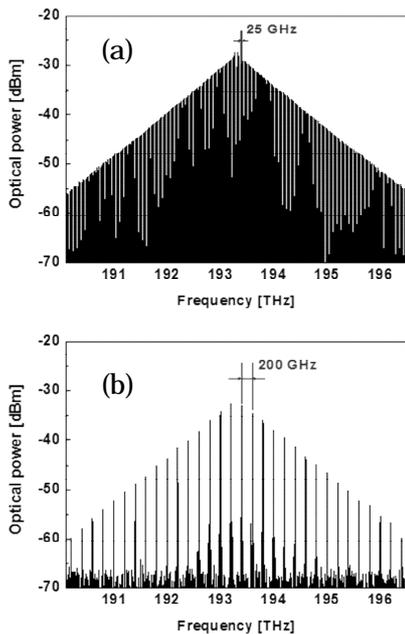


Fig.10 Spectra of a) 25GHz and b) 200GHz optical frequency combs.

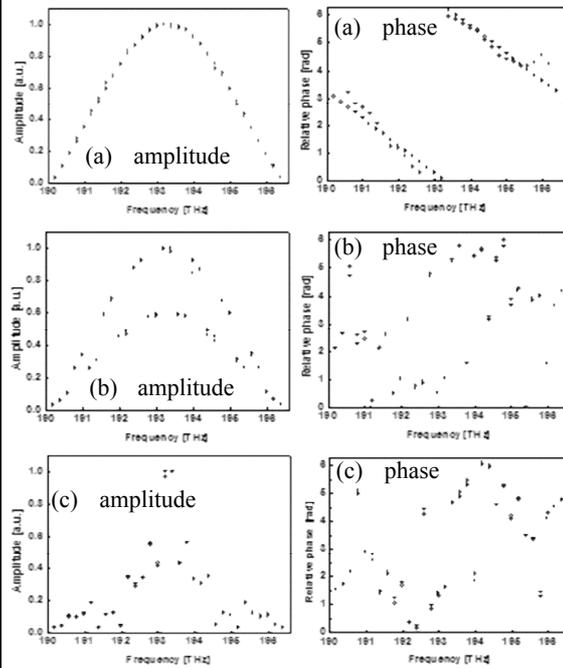


Fig. 11 Measured and simulated spectra of packets of (a) “1000000000000000”, (b) “1000100000100000,” and (c) “1011001110011110”.

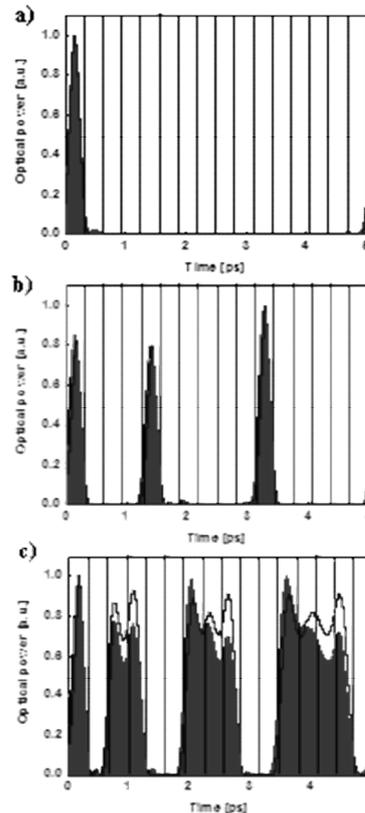


Fig. 12 Measured and simulated waveforms of a) “1000000000000000,” b) “1000100000100000,” and c) “1011001110011110”.

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 12 件)

T. Yamazaki and T. Shioda "Application of dual-heterodyne mixing to optical phase-shift keying," Jpn. J. Appl. Phys. 53 012501 (2014) doi: 10.7567/JJAP.53.012501 査読有.

T. Q. Banh, K. Suzuki, and T. Shioda, "Development of an incoherent optical frequency comb interferometer for long-range and scanless profilometry and tomography," Opt. Commun. 296 (1), pp. 1-8 (2013) 査読有.

T. Shioda, N. Shimizu, and M. Nakamura, "Three-wavelength Parallel Optical Fiber Dispersion Measurement Using Dual-heterodyne Mixing," Appl. Opt. 51 (27), pp. 6586-6593 (2012) 査読有.

T. Shioda and T. Yamazaki, "Ultrafast Optical Frequency Comb Synthesizer and Analyzer," Opt. Lett. 37 (17) pp. 3642-3644 (2012) 査読有.

T. Yamazaki, M. Kuzuwata, and T. Shioda, "Spectral Waveform Measurement of 2 THz Optical Frequency Comb by Dual-Heterodyne Mixing," J. Opt. Soc. Am. B 29 (7), pp.1707-1711 (2012) 査読有.

T. Shioda, T. Morisaki, and K. Suzuki, "Two-dimensional single-shot tomography using a virtually imaged phased array and a spatial phase modulator," Appl. Opt. 51 (21), pp.5224-5230 (2012) 査読有.

T. Shioda, T. Morisaki, and H. Ono, "Single-shot tomography by means of VIPA and spatial phase modulator installed optical interferometer," Opt. Commun. 284 pp. 144-147 (2011).

T. Shioda, K. Fujii, K. Kashiwagi and T. Kurokawa, "High-resolution spectroscopy using interleaved 100GHz optical frequency comb scanned by phase modulator," Opt. Commun. 284 pp. 5180-5184 (2011) 査読有.

他 4 件

〔学会発表〕(計 69 件)

T. Shioda and Toshiaki Yamazaki "Novel Terabit Optical Waveform Synthesizer and Digital Holographic Analyzer based on 400 GHz Optical Frequency Comb," IEEE Photonics Conference 2012, W13 Sep. 23 2012, San Francisco, USA.

M. Sakatsume, Y. Mikawa, T. Q. Banh, and T. Shioda, "Novel tomography of simultaneous imaging and material characterization by spatially-resolved spectroscopy," IEEE Photonics Conference

2012, WT5 Sep. 23 2012, San Francisco, USA.

M. Nakamura, N. Shimizu, T., Yamazaki, and T. Shioda, "Optical Dispersion Spectroscopy using Optical Frequency Comb," IEEE Photonics Conference 2012, ThF1 Sep. 23 2012, San Francisco, USA.

Q. T. Banh, K. Suzuki, M. Kimura, and T. Shioda, "Development of a tunable optical frequency comb," The 17th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2012) 5F2-1 Jul. 2, 2012, Busan, Korea.

T. Yamazaki, H. Ono, and T. Shioda, "2Tb/s Digital Holographic Optical Frequency Comb Synthesizer / Analyzer," The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim (IQEC/CLEO Pacific Rim 2011) 5660-CT-2 Aug. 31, 2011, Sydney, Australia.

M. Kuzuwata and T. Shioda, "Spectral Waveform Measurement of 500 GHz pulse by Dual Heterodyne Mixing Method," The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim (IQEC/CLEO Pacific Rim 2011) 4700-PO-120 Aug. 31, 2011, Sydney, Australia.

T. Yamazaki, H. Ono, and T. Shioda, "2THz Optical Waveform Measurement by Development of Digital Holographic Synthesizer & Analyzer of 400GHz Optical Frequency Comb," The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) ThB129 2011 May. 1, Baltimore, USA.

他 62 件

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称: 光周波数コム発生装置

発明者: 塩田達俊

権利者: 塩田達俊

種類: 発明

番号: 2011-286759

出願年月日: 2011 年 11 月 26 日

国内外の別: 国内

他 1 件

〔その他〕

ホームページ等

塩田研究室

<http://optel.ees.saitama-u.ac.jp/>

埼玉大学研究者総覧

<http://s-read.saitama-u.ac.jp/researchers/pages/researcher/vTsrVyk>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩田 達俊 (SHIODA, Tatsutoshi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 10376858