

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：12401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600114

研究課題名(和文) シングルショット-フェムト秒時間分解光周波数コムアナライザの研究

研究課題名(英文) Investigation of single-shot femto-second time-resolved optical frequency comb analyzer

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：既存の計測手法に頼らず、非対称な超高速波形を高感度に計測できるフーリエ空間の多波長電界ヘテロダイン検波法と呼ばれる手法を開発した。光コムの隣接ピーク間の相対位相を、参照光コムを用いて検出する。フーリエ空間光源システムの試作・動作を下記項目に沿って行った。

1. 25GHz光周波数コム(256波)をシード光とした200GHz光周波数コム(32波)を生成した。
2. 光コムのパルス列をスペクトル領域つまり光コムの電界スペクトルをデジタルにより波形時間内に測定することに成功した。測定した光電界スペクトルを逆フーリエ変換することで繰返し時間内で時間波形を測定して再現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a technique called multi-wavelength electric field heterodyne detection on Fourier space that can measure the asymmetrical ultrafast waveforms with high sensitivity. The relative phase between the adjacent peaks of the optical comb are detected by using the reference optical comb. A prototype and operation of the Fourier space light source system was carried out along the following items.

1. The 200GHz optical frequency comb of 32 waves was generated with the seed light source of 25GHz optical frequency comb (256 waves).
2. The pulse train of the optical comb, ie, the electric field spectrum of spectral region was measured in a time of the waveform changing by the digitizer. And it succeeded in reproducing by measuring the waveform within a repetition time by inverse Fourier transformation of the measured light field spectrum.

研究分野：光応用計測

キーワード：光計測

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒の時間分解能をもつ計測法は種々存在する(表 1)。Pump-probe 法はこれまでに最も時間分解へ適用され成果を挙げてきた手法であるが、フェムト秒の時間分解能を得るためには光路長の機械的な走査に頼ほかになくシングルショット計測は不可能である。この点は自己相関法や FROG 法にも共通する。一方、SPIDER 法はシングルショット計測を可能であるが、1 パルス内の電界計測に過ぎず、繰返しパルスの長時間過渡計測への適用は不可能である。一方、申請者が開発したパルスシンセサイザでは、(1)高速繰返し性能、(2)コム間隔を超える時間計測範囲、(3)シングルショット計測への適用性は検討されたことが無く、本研究で新規システムを構築することで上記機能を開発する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、フェムト秒の時間分解能で“シングルショット計測”できる光センシングシステムを開発して、物質のポンプ・プローブ過渡吸収計測に利用できる新規な時間分解光ベクトルアナライザを設計・試作することである。

具体的には、25GHz 光コムを元に独自の手法で発生した 200GHz 光コム(帯域 6.4 THz)の光電界をホログラフィック光周波数コム合成法により制御して繰返し 3.2THz(時間間隔: 312.5 fs) の光パルス列を得る。さらに申請者が開発した二波長同時ヘテロダイン検波法で 200GHz 間隔光コムの振幅・位相スペクトルを 25GHz 間隔でサンプリングし、その積算時間を繰り返し時間(=1/25GHz)に設定する。また、デジタイザを用いた単一ショット任意波形計測の基礎検討を行う。

3. 研究の方法

3 - 1. 「光周波数コム合成・解析法の 22.4 Tbit/s 位相・振幅複合変調方式への適用して高速性能の確認」

実験系を Fig 1 に示す。信号光の光周波数コムの種光源には DFB-LD(193.300 THz) を使用し、光周波数コム発生器(OFCG) に入射してコム間隔 25 GHz の光コムを発生させた。発生させた光コムをカラーレスアレイ導波路格子 AWG1(FSR 200 GHz) に入射し、周回性を利用することで 200 GHz 間隔の光コムを帯域 6.4 THz (32 波) に渡って生成した。生成した 200 GHz 光コムをカラーレス AWG と 32 ch の振幅・位相変調器を集積したカラーレス光シンセサイザに入射した。変調器を独立に電流制御することにより光コムの縦モードの位相、振幅を変調した。一方、参照光には信号光と周波数が 200 MHz だけ異なるレーザー光を種光として、OFCG で 25 GHz 光コムを発生した。これを光シンセサイザの出力と合波し、AWG3 を用いた並列計測可能な、多波長同時ヘテロダイン検波法を用いて位相スペクトルを計測した。また、振幅スペクトルの計測は光スペクトルアナライザにより計測し得た。具体的には 4 値の振幅変調

と 32 値の位相変調を組み合わせた波形の制御・計測をめざした。位相変調信号パターンを 32 値のデータとして、”31 → 29 → 18 → 23 → 9 → 17 → 2 → 19 → 3 → 0 → 1 → 0 → 15 → 16 → 20 → 29”と設定した。また、振幅は相対的な大きさとして”3 → 3 → 2 → 2 → 1 → 1 → 0 → 0 → 2 → 2 → 1 → 1 → 0 → 0 → 3 → 3”に設定し、複合変調信号の生成と計測を行った。

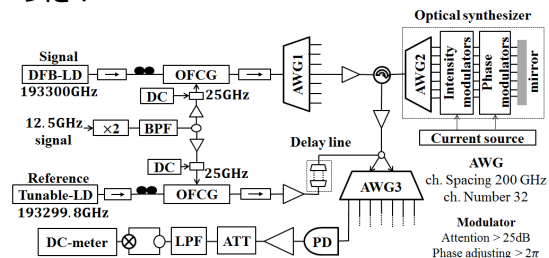


Fig 1: Experimental setup.

3 - 2. 「単一ショット任意光波形計測の基礎検討」

実験系を Fig 2 に示す。信号光の光源には DFB レーザ (周波数 193.300THz) を使用し、強度変調器に入射してパルスパターンジェネレータ (PPG) で発生したパルス幅約 100ps で繰返し 1GHz の光信号を発生させた。今回はこの信号を周波数帯域 10 GHz に渡って計測した。一方参照光には波長可変レーザーを種光源とし、2 遜倍駆動された強度変調器を用いることで種光源の周波数と±500 MHz 離れた 1GHz 間隔の 2 波長を発生させた。参照光は信号光と 200MHz 異なる周波数に設定した。信号光と参照光はカプラによってそれぞれ 3 つに分岐し、それぞれ 1GHz の 0°, 90°, 180° に相当する光路差をつけて合波する。今回は光路差を変えることで実質的に分岐した。合波した光をフォトダイオードで検波し、BPF, divider, mixer に通して得られる二波長同時ヘテロダイン検波信号の DC 電圧を 3 点取得することで振幅スペクトル計測を必要としない位相検出を行った。ここで、シングルショット計測の実証のために DC 電圧はパルス繰返し時間である 1ns で取得した。得られた位相スペクトルと理論的な振幅スペクトルを逆フーリエ変換することで時間波形を得た。

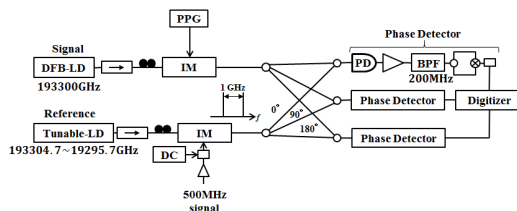


Fig 2: Experimental setup.

4. 研究成果

4 - 1. 「光周波数コム合成・解析法の 22.4 Tbit/s 位相・振幅複合変調方式への適用して高速性能の確認」

計測したスペクトルを逆フーリエ変換して時間波形を復元した結果を Fig 3 に示す。ま

た，得られた波形を 16 分割し，それぞれの波形を sin 関数でフィッティングすることで導出したビットごとの位相変化と振幅変化を Fig 4 にそれぞれ示す．Fig 3, 4 から設定した変調パターンに追従したものが得られていることが確認できる．以上の結果から，振幅・位相複合変調による信号波形生成・計測を実証することができた．

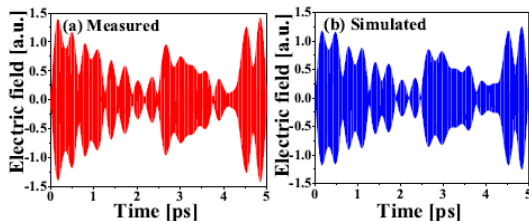


Fig 3: (a) Experimental and (b) simulated waveforms.

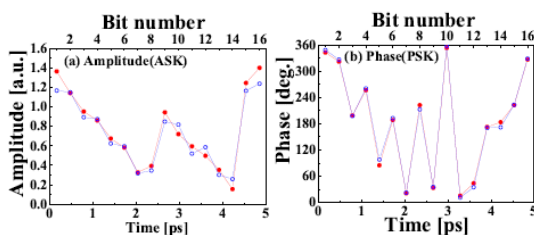


Fig 4: Experimental (closed circles) and simulated (open circles) results of (a) amplitude and (b) phase shift keying modulated signals.

4 - 2 . 「単一ショット任意光波形計測の基礎検討」

計測した位相スペクトルを Fig. 5 に示す．また，得られた位相と振幅スペクトルを基に得た時間強度波形を Fig. 6 に示す．この結果から，設定した変調パターンと同様の波形が得られていることが確認できる．以上の結果から，単一ショット任意光波形計測法による繰り返し時間内での波形計測を実証することができた．

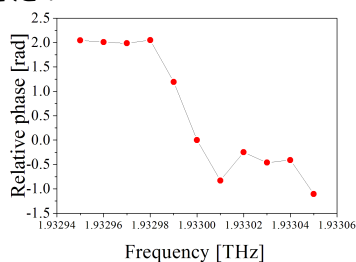


Fig. 5: Measured phase spectra.

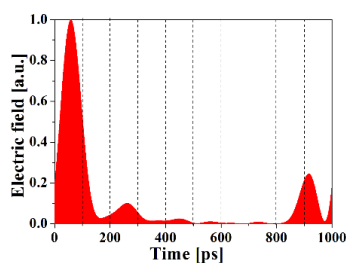


Fig. 6: Experimental waveform.

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 8 件)

T. Q. Banh, K. Suzuki, M. Kimura, and T. Shioda, "Two-dimensional high-speed and long-range tomography and profilometry using liquid-crystal Fabry-Perot resonator," Appl. Opt. 54 pp. 912-918 (2015) 査読有.

塩田達俊「多層構造の構造解析を目指す非接触なシングルショット断層イメージング技術」塗装工学 50 pp. 60-67 (2015) 査読有.

塩田達俊「超高速光周波数コム合成・解析法を用いたフェムト秒任意光波形制御」レーザー研究 42 (9) pp. 722-728 (2014) 査読有.

T. Yamazaki and T. Shioda, "Application of dual-heterodyne mixing to optical phase-shift keying," Jpn. J. Appl. Phys. 53 pp.012501-1-5 (2014) 査読有.

Y. Cai, M. Aoyagi, A. Emoto, T. Shioda, T. Ishibashi, "Polarization State of Scattered Light in Aperture less Reflection-mode Scanning Near-Field Optical Microscopy," J. Mag. 18 pp.317-320 (2013) 査読有.

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

T. Shioda, "Rapid optical data processing in the frequency domain," SPIE newsroom (2013).

塩田達俊「振幅・位相計測による光パルス/パケット任意波形計測」Telecom Frontier 79 pp. 1-10 (2013).

(学会発表)(計 31 件)

T. Shioda, "Femto-second Arbitrary Optical Waveform Synthesis Based on Optical Frequency Comb Synthesizer and Analyzer," Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2014) 2014 年 08 月 27 日 ~ 2014 年 08 月 28 日, 中国広州 (招待講演) .

T. Miyamoto, M. Ito, T. Yamazaki, T. Shioda, "Application of Optical Frequency Comb Synthesizer/Analyzer to 22.4 Tbit/s Composite Amplitude and Phase Shift Keying," Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2014) 2014 年 08 月 27 日 ~ 2014 年 08 月 28 日, 中国広州.

T. Shioda and T. Kurokawa, "High-resolution Spectroscopy with Single-sideband Optical Modulator and Optical Frequency Comb," Synthesizer and

Analyzer," Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2014)(招待講演).

T. B. Quoc, T. Shioda, "Optical Zoom for the Single-shot Tomography and Profilometry Using Diffraction Orders of a Reflection Grating," BISC '14 (Biomedical Imaging and Sensing Conference 2014)2014年04月23日~2014年04月24日パシフィコ横浜(神奈川県横浜市).
T. Sato and T. Shioda, "Range Expansion Using Higher Order Optical Frequency Comb Interferometry," BISC '14 (Biomedical Imaging and Sensing Conference 2014)2014年04月23日~2014年04月24日パシフィコ横浜(神奈川県横浜市).

M. Ito, T. Miyamoto, M. Nakamura, T. Yamazaki, T. Shioda, "Dispersion Measurement and Compensation using Optical Frequency Comb," CLEO2014 2014年06月10日~2014年06月13日米国サンノゼ

T. Yamazaki, T. Shioda, "Application of Optical Frequency Comb Synthesizer/Analyzer to Tbit Multilevel Phase Modulation," The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim(CLEO-PR 2013)2013年07月02日~2013年07月02日京都(京都国際会館).

T. Q. Banh, T. Shioda, "Improvement of the 2D Single-shot Tomography and Profilometry for a Scattered Media," JSAP-OSA Joint Symposia (第74回応用物理学会秋季学術講演会)2013年09月19日~2013年09月19日京都(同志社大学)
T. Shioda, B. Q. Tuan, "Spatially-resolved spectroscopy for simultaneous distinguishment of both structures and materials," Optical Sensors (SENSORS) 2013年07月16日~2013年07月16日 Puerto Rico.

他 32 件

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 過渡吸収応答検出装置および過渡吸収
応答検出方法

発明者: 塩田達俊

権利者: 埼玉大学

種類: 発明

番号: 特願 2014-039995

出願年月日: 2014年02月28日

国内外の別: 国内

〔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