

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 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：2015～2016

課題番号：15K13372

研究課題名(和文)フェムト秒時間分解光コムシングルショット過渡吸収分光法の研究

研究課題名(英文) Study of a femtosecond time-resolution single-shot transition absorption spectroscopy using optical frequency comb

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：フェムト秒の時間分解能で数10ピコ秒の計測時間をもつシングルショット任意光波形制御/計測技術の実現をするために、これまでに我々は光周波数コムシンセサイザ/アナライザを開発した。ここで、時間分解能と制御時間領域の比と、その計測制御時間での積算時間を改善するために前者に対しては200 GHzコムのピーク間を25 GHzでサンプリングすることで計測時間を5ピコ秒から40ピコ秒へ拡大することを目指す。また、後者に対しては40ピコ秒の時間窓で信号光を切り出して1 GHzデジタイザでシングルショット計測することで、疑似的な25 GHz(40 ps)デジタイザでのシングルショット計測を実証した。

研究成果の概要(英文)：We have developed optical frequency comb (OFC) synthesizer/analyzer, which basically controls the comb lights on a frequency axis. To apply the previous OFC analyzer to single-shot measurement, it is necessary to use a digitizer whose integration time is required to be the time range for the previous OFC analyzer. It is, however, difficult to prepare an ultrafast digitizer covering several ten GHz frequency band corresponding to the 10 picosecond time region. Thus, we have proposed following two new concepts. For the first problem, 5 ps measurement time region was extended to 40 ps by measuring the amplitude and phase spectra with a sampling mode space of 25 GHz intervals between 200 GHz comb mode interval. For the second problem about the difficulty to prepare the fast-capturing digitizer, the single shot measurement was realized with a 1 GHz digitizer by cutting-out the optical dual-heterodyne spectrum in 40 picoseconds time window from continuously repeated waveforms.

研究分野：光計測

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、既存技術では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るほかになくシングルショット計測は不可能であった。この点は自己相関法や FROG 法にも共通する。また、SPIDER 法はシングルショット計測が可能であるが、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を有すが、光周波数コム光によるシングルショット可視 近赤外ポンプ・プローブ計測は実証されていない。

表1 フェムト秒領域での光計測法

	原理	問題点
Pump-Probe法	光路長で時間を走査する	
自己相関法	自己相関関数の計測	シングルショットは不可能
FROG法	参照パルスをゲート信号により時間分解計測する	
SPIDER法	周波数をずらした自己位相干渉光を分光計測	フェムト秒時間分解は不可能
パルスシンセサイザ(既存)	25GHz間隔1THz帯域の光コムの振幅・位相制御	帯域の限界数100GHz(>1ps)
スーパーコンティニューム光	非線形ファイバにパルス光を入射し波長変換	可視光でギガヘルツコムがない
本提案手法	光コム振幅・位相制御/解析法と、SC光波長変換によるSC波長変換可視ポンプ光の同期制御	シングルショットでfs時間分解分光が可能

2. 研究の目的

フェムト秒の時間分解能で数 10 ピコ秒の計測時間をもつシングルショット任意光波形制御/計測技術の実現をするために、これまでに我々は光周波数コムシンセサイザ/アナライザを開発した。そして、光パルスシンセサイザ(OPS)により光周波数コムの縦モードの振幅と位相を制御・計測することで、高速な任意の時間波形を最大 6.4 THz 帯域の帯域で制御できることを示した。しかし、OPSの基板サイズの制約から時間分解能と制御時間領域の比は 32 程度に制限される。また、同手法をシングルショット計測に拡張する場合、単純にはその計測制御時間を積算時間とするデジタイザが必要となる。これらの問題を解決するために前者に対しては 200 GHz コムのピーク間を 25 GHz でサンプリングすることで計測時間を 5 ピコ秒から 40 ピコ秒へ拡大することを目指す。また、後者に対しては 40 ピコ秒の時間窓で信号光を切り出して 1 GHz デジタイザでシングルショット計測することで、疑似的な 25 GHz(40 ps)デジタイザでのシングルショット計測を実現する。

3. 研究の方法

(1) 計測時間レンジの拡大

ピコ秒時間窓 2 波長同時ヘテロダイン検波の原理確認に用いる時間波形を図 1 に示す。200GHz コムの時間波形は 5ps 繰返しパル

スである。このような波形に対して 40ps のサンプリング時間で測定を行っても 200GHz 間隔のコム測定により 5ps 繰返しパルスを得ることができる。ここで、40ps 内の情報のみがほしいがサンプリング時間が 40ps に対して長い場合の測定においては、あらかじめ時間窓切り出しを行いサンプリング時間内で 40ps 間だけ信号が入力され、その他の時間はゼロとすることで 40ps のサンプリング時間で測定することと同様の結果が得られると考えられる。実験系を図 2 に示す。信号光、参照光光源に 200MHz の周波数差を与えそれぞれ光周波数コム発生器(OFCG)で 25GHz 間隔の光周波数コムとした。信号光はカラーレス AWG の周回性を利用し 200GHz 間隔の周波数コムとした後、IM1 で FWHM40ps となるよう切り出し IM2 で繰返し周波数を 1GHz とした。信号光を参照光と合波し、カラーレス AWG で 200GHz 間隔となった信号光の隣接 2 波を AWG2 で選択し合波した後、帯域 3THz にわたって 2 波長同時ヘテロダイン検波した。2 波長同時ヘテロダイン検波ではあらかじめ光源につけていた周波数差 200MHz のビート信号を分波・二乗することで得られた DC 電圧をデジタイザで測定した。デジタイザは RF 系と同期されており、時間窓の繰返し周波数 1GHz で測定することで、原理上のシングルショット計測の確認を行った。

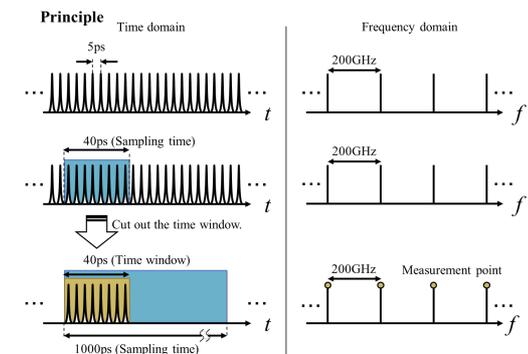


図 1. 時間波形とスペクトルの関係

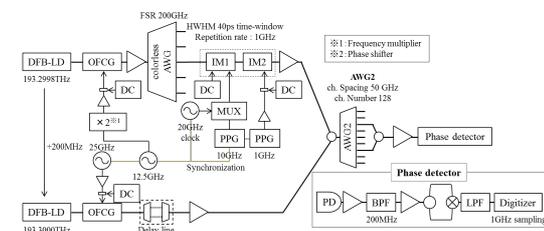


図 2. 計測時間レンジ拡大を確認するための実験系

(2) サンプリング積算時間の拡大

サンプリング積算時間領域の拡大を確認するための実験系を図 3 に示す。DFB-LD(周波数 193.3000 THz)を光源とし光周波数コム発生器(OFCG)で 25 GHz 間隔の光周波数コムとした後、信号光(Fig. 1.上側)と参照光(Fig. 1.下側)に分波した。信号光はカラーレス AWG の周回性を利用して 200 GHz 間隔のコムとし、吸収のサンプルとして強度変調器(IM-S)で 12.5GHz の正弦波の強度変調を与えた。吸収

を与えた信号光を IM1 と IM2 で半値幅 40 ps, 繰り返し周波数 500 MHz の時間窓切り出しを行った．参照光は音響光学変調器(AOM)で 148.8 MHz の周波数シフトを与えた．時間窓切り出した信号光と周波数シフトした参照光を合波し BPF で 50 GHz または 200 GHz 間隔の隣接 2 波を取り出し 2 波長同時ヘテロダイン検波法を用いて相対位相を 1 GHz デジタルで計測した．

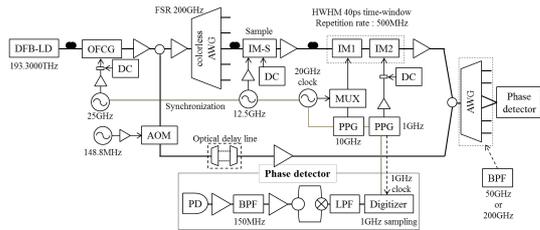


図 3 . サンプルング時間を長尺化するための実験系

#### 4 . 研究成果

##### ( 1 ) 計測時間レンジの拡大

図 4 a),b) に光スペクトルアナライザで測定した振幅スペクトルと 2 波長同時ヘテロダイン検波で測定した位相スペクトル, また, シミュレーション値として OFCG の理論的な位相スペクトルを示す. また, 図 4 a) の強度スペクトルと図 4 b) の位相スペクトルを使って時間波形を再現し, 規格化・時間のシフトを行った波形をそれぞれ図 5 a),b) に示す. 図 5 より, 測定データから再現した波形とシミュレーション波形ともに 5ps 内に 1 つのパルスが立つような波形を得ることができた. これより 40ps 時間窓で切り出した光の 1GHz サンプルングによる 200GHz 位相計測の実証を示唆している .

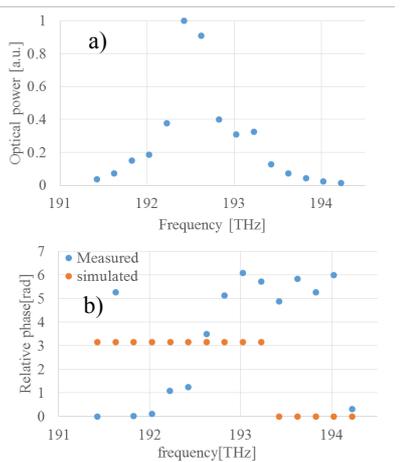


図 4 . a) 振幅と b) 位相スペクトルの測定結果

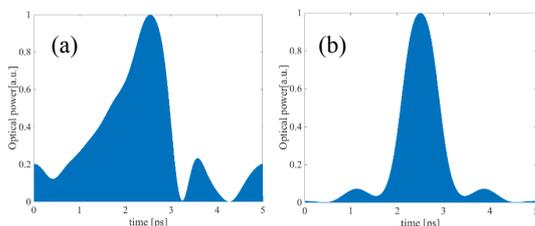


図 5 a) 実験と b) シミュレーションで得た光波形.

( 2 ) サンプルング積算時間の拡大  
強度変調器 ( IM-S ) に正弦波マイクロ波信号を入力した際に実験的に測定した相対位相スペクトルを図 6 に示す.

図 7 に IM-S に入力する RF 信号をオンまたはオフにした時それぞれで得られたスペクトルから再現した時間波形を示す . さらに図 8 に, 図 7 の波形を 5 ps ごとに積分し透過率を求めた波形を示す . これらの結果から 200 GHz 間隔のコムモード間を 25 GHz 間隔で取得することで 40 ps にわたる波形の変化を観測できることがわかった . 以上よりシングルショット光波形計測へ向けた原理確認実験としてピコ秒計測時間レンジの拡大を実証した .

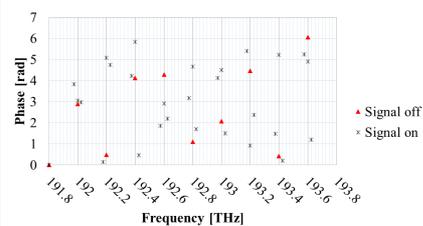


図 6 . 信号有無それぞれで観測された位相スペクトル

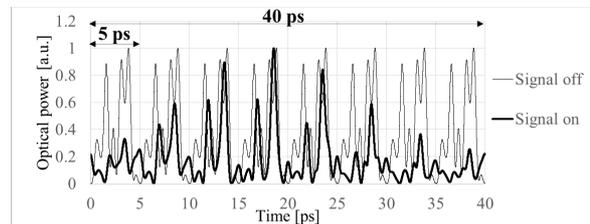


図 7 . 時間波形

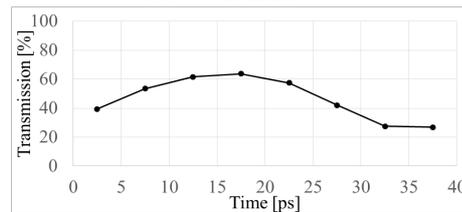


図 8 . 5 ps 毎に時間積分した透過率の時間変化

#### 5 . 主な発表論文等

( 研究代表者には下線 )

[ 学会発表 ] ( 計 3 8 件 )

塩田 達俊, “ 光コム合成 / 解析法による超高速光波形計測と分散計測 ” 第 3 3 回先端光量子科学アライアンスセミナー 「 光周波数コムの技術の新展開 」 2017 年 3 月 3 日 先端光量子科学アライアンス、慶應塾大学先端研究センター 「 先端光波制御技術研究センター 」 慶應義塾大学 日吉キャンパス ( 招待講演 )

T. Shioda, High-speed 2D single-shot interferometry for tomography,” DHIP2016 The Sixth Japan-Korea Workshop on Digital Holography and information photonics, Inv20-p6, 2016 年 12 月 19 日 ~ 12 月 22 日 札幌コンベンションセンター ( 招待講演 )  
B. Q. Tuan, T. C. Tuan, Heui-Hyeon Kim, T. Shioda, “2D single-shot profilometry for

scattered media using Supercontinuum source interferometry in visible region,” The 6th Asia Pacific Optical Sensors Conference, 2016年10月12日～14日, Haoran High-tech Mansion, Shanghai, China  
H. Ariya, B. Q. Tuan, T. Shioda, “Long-range single-shot 2-dimensional profilometry using multi-order comb interferometry,” The 6th Asia Pacific Optical Sensors Conference, 2016年10月12日～10月14日, Haoran High-tech Mansion, Shanghai, China  
H. Sugimoto, M. Ito, M. Koriba, S. Seki, T. Shioda, Y. Tanaka, K. Kashiwagi, T. Kurokawa, “High-resolution spectroscopy using a frequency-variable comb light source,” the 2016 IEEE Photonics Conference 2016年10月3日, Hilton Waikoloa Village (Hawaii USA)  
B. T. Tuan, T. Shioda, “A pseudo optical frequency comb interferometry by an optical resonator and a high-speed swept-source for 2D single-shot tomography and profilometry,” Photonics West 2016年2月1日, San Francisco, California, USA  
T. Shioda, H. Ariya, “Optical Frequency Comb Interferometry for Single-shot 2-dimensional Imaging,” Advanced Photonics Congress 2016年7月17日～7月22日, The Fairmont Hotel Vancouver  
K. Kasuga, T. Shioda, “Optical dispersion spectroscopy using optical frequency comb applied to dual-heterodyne mixing,” Photonics West 2016年2月1日, San Francisco, California, USA  
R. Onita, T. Shioda, “Spatially-resolved spectroscopy using swept-source optical interferometry,” Photonics West 2016年2月1日, San Francisco, California, USA  
T. Miyaoka, T. Shioda, “Frequency-domain single-shot optical frequency comb tomography using VIPA” Photonics West 2016年2月1日, San Francisco, California, USA  
T. Shioda, “Application of optical frequency comb tweezing to terahertz arbitral waveform synthesis,” EMN Meeting On Vacuum Electronics 2015年11月21日～11月25日, Las Vegas, NV USA(招待講演)  
T. Miyamoto, T. Hasegawa, T. Shioda, “THz optical pulse train synthesizer and analyzer for femtosecond clock generation,” EMN Meeting On Vacuum Electronics 2015年11月21日～11月25日, Las Vegas, NV USA(招待講演)  
B. Q. Tuan, T. Shioda, “Control the optical magnification of a zooming tomography and profilometry with a spatial phase modulator installed interferometer,” Optical Sensors in

Proceedings Advanced Photonics 2015年6月27日～7月1日 Boston. Massachusetts, USA

T. Miyaoka, T. Shioda, “Single-shot Optical Frequency Comb Imaging Using VIPA,” Optical Sensors in Proceedings Advanced Photonics 2015年6月27日～7月1日, Boston. Massachusetts, USA

T. Miyaoka, T. Shioda, “Novel Two-Dimensional Single-Shot Optical Imaging System by VIPA-Comb Interferometry,” The 5<sup>th</sup> Asia Pacific Optical Sensors Conference 2015年5月20日, Lotte City Hotel Jeju, Korea

B. Q. Tuan, T. Shioda, “Single-shot Long-Range and Zoomable Optical Tomography and Profilometry using a Diffraction Grating and a CCD Camera,” The 5<sup>th</sup> Asia Pacific Optical Sensors Conference 2015年5月22日, Lotte City Hotel, Jeju, Korea

他2件

〔産業財産権〕  
出願状況(計1件)

名称：形状測定方法及び形状測定装置  
発明者：塩田達俊 和田裕明  
権利者：本田技研工業株式会社、国立大学法人埼玉大学  
種類：発明  
番号：2015-105371  
出願年月日：2015年5月25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