

令和元年5月29日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14691

研究課題名(和文) マッハツェンダ変調器を用いた超高速イメージングシステムの研究

研究課題名(英文) Ultrafast optical imaging system based on a Mach-Zehnder modulator

研究代表者

横田 信英 (YOKOTA, Nobuhide)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：00734542

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：超高速単発過渡現象のイメージングを可能とするSequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)法への適用に向けて、相対遅延を有する多波長パルス光を簡便に生成可能な光源構成を提案し、その原理検証実験を行った。マッハツェンダ変調器と位相変調器にパルス電圧を印加することで約17 psのパルス光を生成し、変調器へ入力する多波長CWレーザー光の波長間隔や伝搬光ファイバ長を制御することで多波長パルス光の遅延を精密に制御できることがわかった。今後、STAMP法に適用した簡便なイメージング構成の実現が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノ秒よりも高速な超高速単発過渡現象を簡便に観測するための測定技術が普及することにより、新規物理現象の解明や新たな視点からのデバイス評価技術の確立が期待できる。本研究ではそのような超高速単発過渡現象を測定可能なSTAMP法で要求される光源の大幅な小型簡便化につながる技術を提案し、それを実験的に原理検証することに成功した。今後、本技術のSTAMP法への適用を進めることで、新材料開発などの様々な領域において技術発展の加速が期待できるものである。

研究成果の概要(英文)：A simple laser configuration of a multi-wavelength optical pulse generator with a certain relative delay was investigated aiming at application to the sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP). Wavelength-multiplexed optical pulses with a duration of 17 ps were generated by applying an electrical pulse to a Mach-Zehnder modulator and phase modulator, and the relative delay was controlled by a wavelength of seed lasers or optical fiber length. Further reduction of the pulse duration is expected when a chirp in the phase modulator is enhanced. The proposed configuration will be suitable for cost-effective measurements with the STAMP.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光エレクトロニクス イメージング マッハツェンダ変調器 STAMP

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年の光エレクトロニクス技術の急速な発展によりナノ秒オーダの撮影速度をもつ高速カメラが開発されているが、電子デバイスの性能限界のためピコ秒オーダ以上の高速性を得ることは困難と予想される。しかしながら、半導体におけるキャリア・フォノンのダイナミクスや磁性材料におけるスピン波の伝搬など、ピコ秒領域の超高速過渡現象には基礎研究・応用研究の両面で極めて重要なものが数多く存在しており、これらの撮影に向けて通常の高速カメラとは異なるアプローチがこれまでに検討されてきた。例えば、ポンプ・プローブ法を用いた場合、フェムト秒オーダの超高速現象のイメージングが可能であるが、単発現象を捉えることができない。ストリークカメラを用いることでサブピコ秒オーダの時間分解能が得られるが、本質的に2次元の空間イメージングが困難である。このような既存の高速イメージング法の限界を打ち破るため、**Sequentially Timed All-optical Mapping Photography (STAMP)**法が考案され[1]、サブピコ秒の高い時間分解能と短いフレーム間隔が得られることが実証されている。この方法では、波長と遅延時間の異なる複数の短パルス光を超高速ストロボ光として用い、被写体に照射後、これらを空間分離してイメージングカメラで一度に撮影する点が特徴である。この超高速ストロボ光を得るために、モード同期チタンサファイアレーザから出力されたフェムト秒パルス光をチャープパルス増幅器によって増幅、繰返し周波数低減、広帯域化させ、そこからスペクトルのフィルタリングによって中心波長の異なる複数のパルス光を発生させる方法が用いられている。この方法は時間分解能の点で優れているが、高出力のフェムト秒パルス光を発生させるためには数千万円オーダの大掛かりなレーザ光源システムが必要である。広帯域パルス光をフィルタリングして正確な遅延時間を与えるため、自由空間における精密な光学系も必要である。また、光フィルタを用いる方法は本質的にエネルギー変換効率が低く、電源などの周辺機器の大型化を招くため、必要なパルス光を必要な分だけ発生させるオンデマンドな方法が望ましい。以上のように、**STAMP**法は優れたイメージング技術として今後の発展が期待できるが、**STAMP**法で必要不可欠な多波長パルス光源をより小型かつ簡便に実現することが重要である。

2. 研究の目的

本研究では光変調器における時間フィルタと時間レンズの機能に着目し、これらに基づく簡便な多波長パルス光源を実現し、その制御性を実験的に明らかにすることで**STAMP**法への適用に向けた足掛かりとする。具体的には、時間フィルタと時間レンズとしてそれぞれマッハツェンダ変調器と位相変調器を用い、生成した多波長パルス光が光ファイバ中を伝搬する際の分散によって受動的にパルス間の相対遅延を制御する手法を検証する。また、本研究では1.5 μm 帯の光波を用いるが、提案手法を用いたミリ波帯・テラヘルツ波帯における過渡イメージングの実現に向けて、光周波数コム生成、光フィルタリング、フォトミキシング技術に基づく光波の波長変換手法の導入を提案し、要素技術として簡便かつ制御性の良い光周波数コム生成手法の実装とその信号対ノイズ (SN) 比の向上を図る。

3. 研究の方法

簡便な多波長パルス光生成を実現するため、図1に示す時間フィルタと時間レンズに基づく構成を提案する。広く知られるように、多波長の平面波を空間フィルタで整形した後、空間レンズで集光することによって、焦点距離において空間フィルタのフーリエ変換に相当する集光されたビームプロファイルが得られるが、レンズの色収差によって波長に依存した集光位置のずれが生じる。これと同様な変形を時間領域で行う。多波長CW光を時間フィルタに相当する強度変調器（マッハツェンダ変調器）と時間レンズに相当する位相変調器によってそれぞれ変調し、分散性媒質として光ファイバを伝搬させることで、波長に依存した相対遅延を有する短パルス光を得ることができる。最終的に得られる多波長パルス光の時間幅は変調器に印加する電気パルス信号の時間幅や振幅に依存し、各パルス光の相対遅延間隔は変調器に入力する多波長CW光の波長間隔や光ファイバ長によって制御可能であると予想され、このような予想を実験結果と比較して検証する。また、生成したパルス光を照明として参照サンプル像をInGaAsカメラで測定し、光源のコヒーレンスに起因するスペckルパターンが顕著でないことを確認する。

また、広帯域光周波数コムを高SN比で生成するため、単側波帯 (SSB) 変調帰還ループ構造と半導体レーザの注入同期現象を活用した手法を実験的に検証し、その実現可能性を検討する。

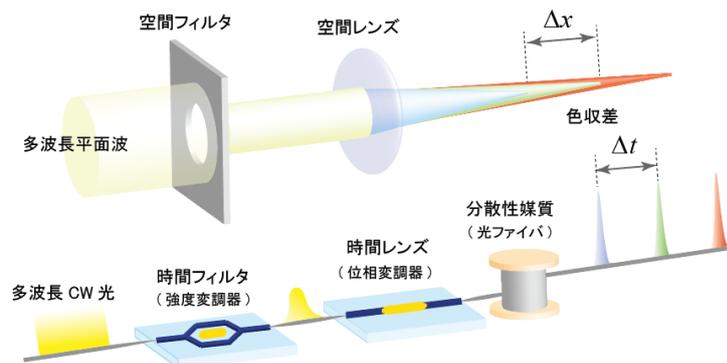


図1 フィルタとレンズに基づく波形変換の概念図

4. 研究成果

(1) 提案光源構成におけるパルス時間間隔と波長間隔の関係

まず、提案光源構成において得られるパルス時間間隔 Δt と波長間隔 $\Delta\lambda$ の関係を調べた。STAMP測定では波長の異なる光パルス列によって観測対象を照射し、イメージング像の時間変化を取得するが、その際に回折格子等を用いて各パルス光を空間的に分離することが必要である。transform-limited (TL)パルス光のパルス幅とスペクトル幅の積はパルス形状に依存した定数となるため、短パルス光を用いるためには十分な波長間隔を確保する必要がある。ガウス型のパルス光を仮定した場合における Δt と $\Delta\lambda$ の関係を図2に示す。時間帯域幅積(0.44)を考慮し、本提案手法によって得られるパルス光の範囲を白塗りで示しており、例えば3 ps程度の時間間隔であれば2 nm程度の波長間隔において得られる。シングルモードファイバ(SMF)の長さ L に依存して適切に分散補償されるパルス光のチャープ量が変化するため、より短パルス化するためには L を低減する必要がある。結果として得られる Δt と $\Delta\lambda$ の値は変化する。ただし、ここで仮定したSMF以外の特殊な分散補償ファイバ等を用いる場合は目的に応じた最適設計が可能である。

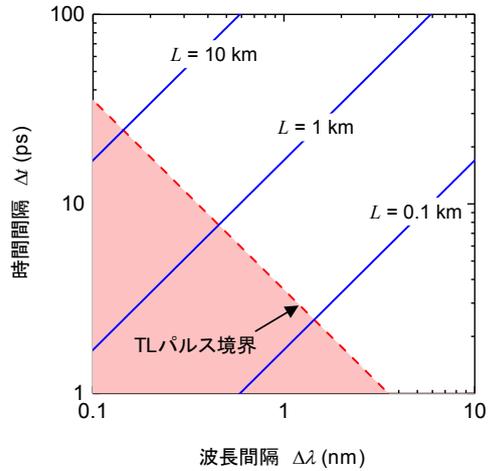


図2 パルス時間間隔と波長間隔の関係

(2) 原理検証実験系の構築

図3に示す実験系を構築した。波長の異なる4つのCWレーザ光を偏光を合わせた状態で合波し、多波長入力光として用いた。各波長は1549.93 nm、1550.44 nm、1550.95 nm、1551.45 nmであり、約0.5 nm間隔に設定している。強度変調器には二電極型のLiNbO₃マツハツェンダ変調器を用い、約100 psの半値全幅を有する電気パルス信号を2 GHzのクロックで生成し、マツハツェンダ変調器の片側の電極へ印加することでゲート動作させた。同様の電気パルス信号をLiNbO₃位相変調器にも印加することで生成されたパルス光にチャープを重畳した。ここで、各変調器の間で電気パルス信号に遅延が生じるため、光路長の遅延時間を調節することで補償した。パルス光は光ファイバ増幅器(EDFA)によって増幅し、光スペクトラムアナライザで光スペクトルを評価した。0 kmまたは10 kmのSMFを伝搬後、EDFAで増幅し、光サンプリングリングオシロスコープを用いて光パルス波形を測定した。

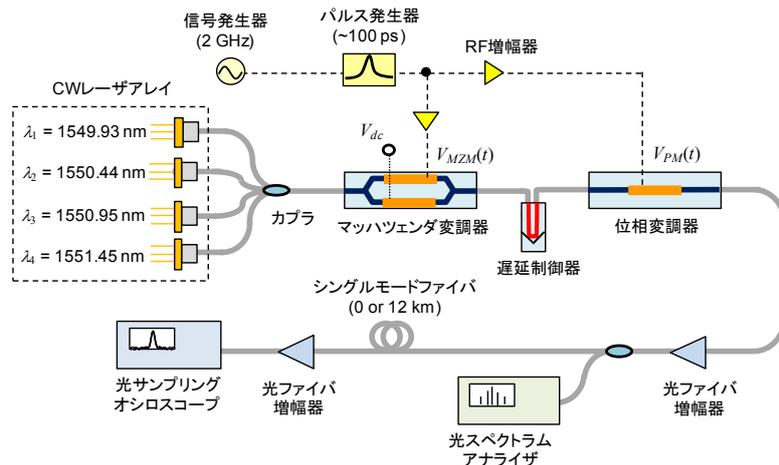


図3 原理検証実験系の構成

(3) 多波長パルス光の評価

生成した多波長パルス光の光スペクトルを図4(a)に示す。中心波長が約0.5 nmずつシフトした4つの波長多重変調光スペクトルが確認できる。このパルス光をSMF伝送による分散補償なしで測定した場合、図4(b)に示すように、中心波長に依存せず約140 psのFWHMを有するパルス波形が重なっていることがわかる。ここで、主パルスの直後に追従する副パルスは用いたRF増幅器の低周波遮断周波数(1 GHz)に起因した電気パルス信号波形の歪によるものであると考えている。一方、図4(c)に示すように、長さ12 kmのSMFを伝送した場合、パルス幅は約17 psまで短パルス化され、中心波長に依存して4つのパルス光の間で相対的な遅延

が生じていることがわかる。図 4(d)に示すように、 $\Delta\lambda$ と Δt の関係は SMF の分散特性 (204 ps/nm) によく一致し、入力 CW 光の波長間隔によって遅延時間を精密に制御できることがわかった。分散補償後のパルス幅は位相変調器におけるチャープ量に依存しており、半値全幅と振幅がそれぞれ約 30 ps、 $2 V_{\pi}$ の電気パルス信号を位相変調器に印加することで、約 1.3 ps までの短パルス化が期待できる。本手法によって生成したパルス光はピコ秒オーダーとなるため、フェムト秒オーダーのパルス光を用いる構成に比べてイメージング時のスペックルパターンが顕著となる懸念がある。そこで、1549.93 nm の CW 光を入力として生成したパルス光を照明とし、InGaAs カメラを用いて 10 $\mu\text{m}/\text{div}$ のスケーラを観察した結果を図 4(e)に示す。明瞭なスケーラの軸が確認でき、位相変調器におけるチャープ量を増大させることによる更なる短パルス化によって、スペックルパターンの影響は更に低減されるものと期待できる。

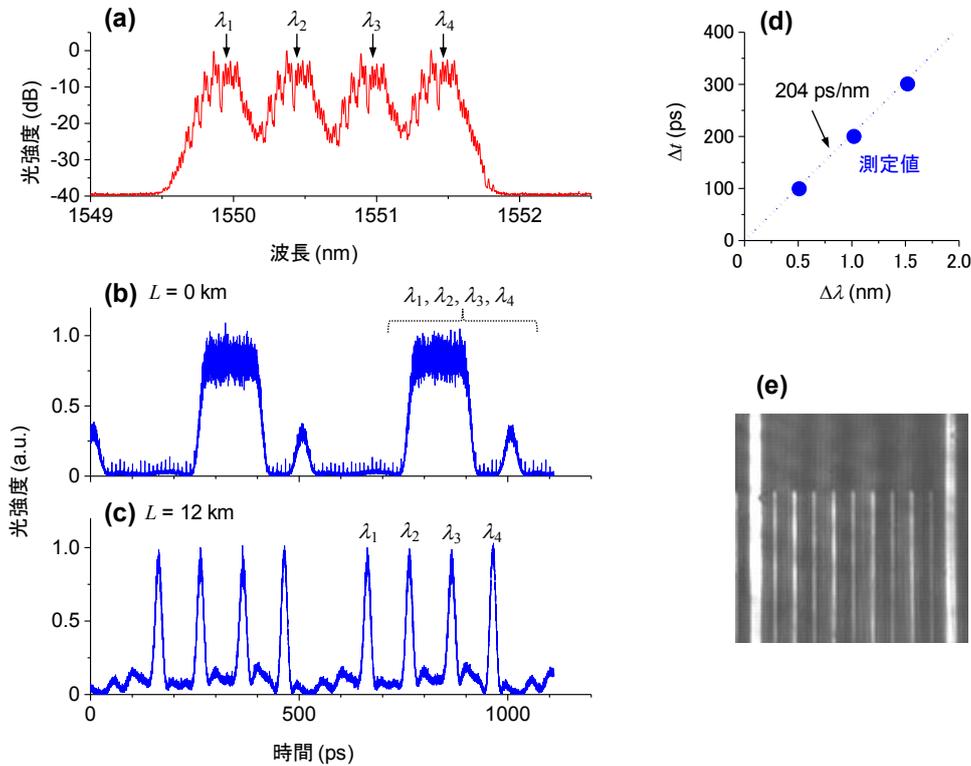


図 4 (a) 光スペクトル、(b) 多波長パルス光波形 ($L=0$ km)、(c) 多波長パルス光波形 ($L=12$ km)、(d) $\Delta\lambda$ と Δt の関係、(e) パルス光照明と InGaAs カメラを用いたスケーラの観察像

(4) 波長多重光周波数コムの同期観測

本研究で提案した光源構成をミリ波帯やテラヘルツ波帯へと拡張するための要素技術として、簡便かつ制御性の良い広帯域光周波数コム発生法が重要となる。SSB 変調帰還ループを活用した光周波数コム生成法は簡便であるが、広帯域化に伴いコムスペクトルの SN 比が劣化するため、これを改善するために半導体レーザの注入同期技術の活用を試みた。

実験構成を図 5 に示す。波長可変レーザと面発光レーザ (VCSEL) の発振波長を 1551.88 nm、1549.94 nm にそれぞれ設定し、各出力光を 3 dB カプラを用いて合波した後、SSB 変調器を含む帰還ループへ入力した。SSB 変調器は短波側へとスペクトルをシフトさせる駆動条件を用いており、変調周波数は 15 GHz に設定した。ファイバブラッグ回折格子 (FBG) は波長 1549.97 nm において 99% の反射率を有しており、その半値全幅は約 38 GHz である。FBG で反射された光は VCSEL を注入同期させるためのマスターレーザ光として用いるため、サーキュレータを介して帰還ループから抽出する。その後、バンドパスフィルタ (BPF) によって自然放光 (ASE) ノイズ成分を低減し、EDFA3 を用いて増幅し、3 dB カプラを通じて VCSEL へ注入した。本構成により、波長可変レーザをシード光とした SSB コムと VCSEL をシード光とした SSB コムが波長分割多重された状態で光出力される。各コムスペクトルが同期していない場合は両者の間に周波数差が生じるが、VCSEL が波長可変レーザをシード光とした SSB コムの末端へと注入同期することによって発振周波数の引込効果が得られ、周波数差のない連続的な SSB コムスペクトルが得られる。

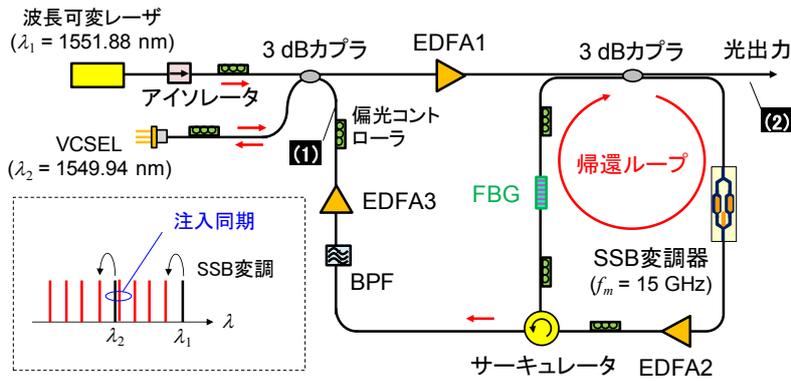


図5 波長多重光周波数コムの同期観測実験系

図5において、(1)の位置において測定したVCSELへの注入光のスペクトルを図6(a)に示す。本スペクトルでは反射型ノッチフィルタとして機能するFBGによって反射されたASEノイズ成分が確認できる。ここで、FBGにおいて単一ではなく複数のSSBコムスペクトル成分が反射されたことが確認できるが、これはFBGの反射帯域半値全幅(38 GHz)に対してコム間隔(15 GHz)が狭いためである。本光源構成から出力される最終的なコムスペクトルの測定結果を図6(b)に示す。ここで、スペクトルは図5における(2)の位置において測定している。サーキュレータを介して帰還される注入光の有無によってスペクトル形状が変化していることが確認できた。注入光なしの場合、マスターレーザに相当する波長可変レーザとスレーブレザに相当するVCSELがそれぞれ独立して発振しているため、波長可変レーザのSSBコム成分とVCSELのSSBコム成分の間に3 GHzの周波数分離が見られた。一方、注入光/VCSEL出力光の強度比が約3 dBの条件下で注入光を導入することでVCSELの発振周波数が波長可変レーザのSSBコム成分に注入同期して引き込まれ、周波数分離が無くなることが確認できた。このように、簡便なSSB変調帰還ループを用いて生成した光周波数コムスペクトルのSN比を半導体レーザの注入同期技術によって向上できることがわかった。今後、光フィルタリングとフォトミキシングを導入することで、提案光源の簡便な波長変換が期待できる。

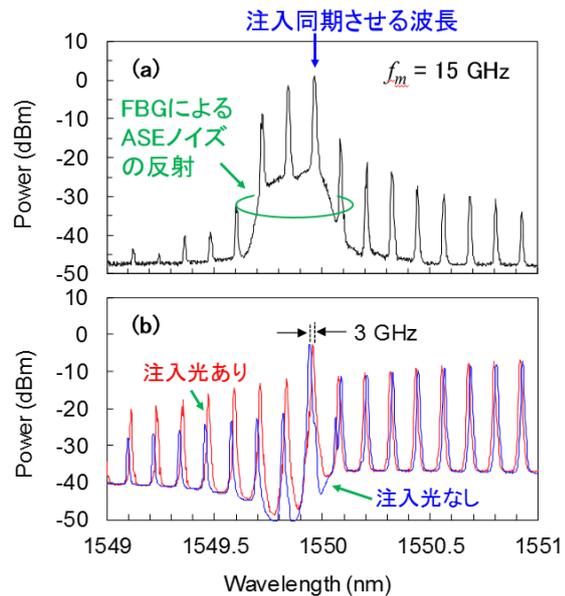


図6 光スペクトルの測定結果
(a)FBG 反射光成分 (b)全光出力

<引用文献>

- ① K. Nakagawa, A. Iwasaki, Y. Oishi, R. Horisaki, A. Tsukamoto, A. Nakamura, K. Hirose, H. Liao, T. Ushida, K. Goda, F. Kannari, and I. Sakuma, Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP), Nat. Photon. 8, (2014), 695

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 横田信英, 小向知也, 吉田真人, 八坂洋, 相互注入同期半導体レーザを用いた IQ 信号生成法の検討, 2019年電子情報通信学会総合大会, 2019, C-4-5
- ② 横田信英, 小向知也, 八坂洋, 注入同期によるSSB変調光周波数コムの広帯域・高S/N化, 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2018, C-3-53
- ③ 横田信英, 八坂洋, 過渡イメージングに向けた光ファイバ型等時間間隔多波長パルス光源の検討, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 2018, 20a-P2-13

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ

<http://www.yasaka.riec.tohoku.ac.jp/index.html>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。