

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：53701

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14152

研究課題名（和文）パルス捕捉現象による非線形光ループミラーを用いた超短光パルス測定技術の開発

研究課題名（英文）Development of ultrashort pulse measurement technique based on nonlinear optical loop mirror using pulse trapping

研究代表者

白木 英二（Shiraki, Eiji）

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：70633147

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、全ファイバー型で全光型の超短光パルス測定技術を開発することを目的としている。パルス捕捉現象による非線形光ループミラー(NOLM)を用いた光パルスのスペクトログラム計測技術の開発を行った。スペクトログラムの構築は、制御光により信号光から抽出された光の光スペクトルを並べることで行う。このスペクトログラムより超短パルス光の強度や位相の分布の計算が可能である。実験と数値解析より、提案する手法による超短光パルス測定の実証及び解析を行った。今回、負のチャープを持つ2.7 psのsech型のパルス波形の観測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法では、2種類の超短パルス光に時間差をつけて超短パルス抽出するため、相互相関信号が得られ、容易に強度および位相情報を測定することができる。ファイバー型デバイスであり、~数十μmという短尺な一般的な複屈折ファイバーで構成される。また、超短パルス光で超短パルス光を制御するため、フェムト秒領域の光成分を抜き出すことが可能である。本研究で提案する技術は、他のファイバーデバイスとの結合性が非常に高く、高性能な超短パルスファイバーレーザー光源などのデバイス開発の発展に大きく貢献すると考えられる。また、超高速な全光型の光計測技術が求められる、光ファイバー通信や医療・生物分野にも有用である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is the development of an all-fiber and all-optical measurement technique for an ultrashort pulse. In this study, we developed a spectrogram measurement technique based on a nonlinear optical loop mirror (NOLM) using the pulse trapping phenomenon. The signal pulse is sampled by the control pulse using the NOLM. And the spectrogram is constructed by arranging the optical spectra of the output signal pulse by the delay time. The intensity and phase distribution of an ultrashort pulse is reconstructed from the spectrogram. We demonstrated our ultrashort pulse measurement technique using pulse trapping both experimentally and numerically. We obtained the pulse shape of 2.7 ps, down-chirped, sech-shaped ultrashort pulse.

研究分野：光・量子エレクトロニクス

キーワード：光ファイバ 超短パルス光 非線形光学現象

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 光量子エレクトロニクス分野で先端の領域である、非線形光学現象の研究は、近年の超短パルスレーザーや光ファイバー技術などの発展に伴い、急速に進展してきた。特に、非線形光ループミラー(以下、NOLM)は、高機能な全光制御技術に有用である。NOLMはサニャック干渉計に基づいている。ループ内を時計回りに伝播する信号光に対して制御光により非線形位相変調を行うことで、出力強度を制御することができる。しかし、これまでのNOLMにおいては、信号光と制御光の間の大きな群速度差のために、十分な位相変化量を得るためにはpsパルスや長尺の高非線形ファイバーであった。

(2) 2002年に、パルス捕捉現象という、新しい光ファイバー中の非線形光学現象が見出された。パルス捕捉現象では、2つの超短パルス光が非線形光学効果を介して互いに捕まえ合い、同じ群速度・時間的に重なって共に伝播する。これを利用することで、信号光に対して高効率に非線形位相変調を行うことができる。

(3) 2013年にNOLM内でこのパルス捕捉現象を誘起することにより超短パルス光を超短パルス光により制御する、全光スイッチング技術が実現された。これにより、十数mという非常に短い一般的な複屈折ファイバーでの動作が可能となった。2015年には時間幅の広いパルス光からフェムト秒領域の光を超短パルス光により抜き出す、全光サンプリング技術も実現された。

(4) このパルス捕捉現象によるNOLMを用いて抽出された光により光スペクトルを測定すれば、スペクトログラムの観測が可能となる。さらに、スペクトログラムから超短パルス光の強度や位相を計測することができる。全光型でファイバー型の超短パルス計測技術の実現が期待される。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、次世代の超高速な光通信や光計測分野で有用となる、全ファイバー型の超高速な全光制御技術の開発を目的とする。具体的には、パルス捕捉現象によるNOLMを用いたスペクトログラム計測技術を開発することを目的とする。さらに、スペクトログラムから超短パルス光の強度や位相分布を取得する。本研究では、実験と数値解析より、提案する超短パルス光を用いたスペクトログラム計測の実証及び解析を行う。

3. 研究の方法

(1) 提案するパルス捕捉によるNOLMを用いたスペクトログラム測定技術の概略図を図1に示す。NOLMはサニャック干渉計に基づいており、偏波保持光ファイバー(PMF)及び偏波保持型3dBカプラ、偏波合波カプラ(PBC)をコネクタ接続した。信号光の入力ポートには反射光を除去するために光サーキュレータを設置した。これらはすべて偏波保持型のファイバーデバイスである。制御光の入力ポートには、信号光と制御光の間に遅延時間を与えるためにミラーによる遅延線を設置した。NOLM中のPMFで群速度整合条件を満たすように、制御光と信号光の偏光方向を高速軸と低速軸に合わせて入射し、2つの波長関係を調節する必要がある。

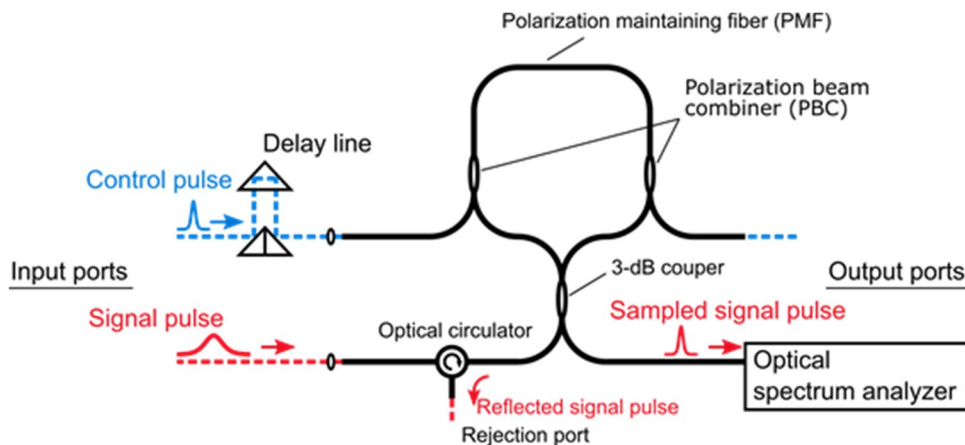


図1 パルス捕捉によるNOLMを用いたスペクトログラム測定技術の概略図

スペクトログラムを構築する原理は次の通りである。まず、信号光を制御光によりサンプリングする。入力ポートより入射された信号光は、3dBカプラにより50:50の割合で分岐されて、ファイバーループを反時計回りおよび時計回りに伝播する。制御光はPBCにより時計回りの信号光と重ね合わせてPMFを伝播させたのち、他方のPBCで除去した。反時計回りに伝播する信号光は光ファイバーの波長分散の効果のみを受けるが、時計回りに伝播する信号光は波長分散の効果に加えて制御光による非線形位相変調も受ける。このとき、時計回りに伝播する信号光は制御光によってパルス捕捉されるため、制御光と同じ群速度・時間的に重なって伝播する。つまり、信号光のうち制御光と重なった成分のみに大きな非線形位相変化を与えることができる。時計回り・反時計回りの信号光はファイバーループを伝播したのち3dBカプラにおいて干渉する。2パルス光の間に位相変化量の差の大きさに応じて場合にNOLMの出力ポートから信

号光が出力される。つまり、制御光により信号光を抜き出す、全光サンプリングを行うことができる。次に、このサンプリングされた信号光を光スペクトルアナライザで光スペクトルを測定する。この測定を遅延線により信号光と制御光の間に遅延時間を与えて行う。遅延時間ごとに光スペクトルを並べることでスペクトログラムを構築する。

(2)入力信号光の強度や位相分布を取得したスペクトログラムから再構築する。各遅延時間の光スペクトルの強度および中心波長を抽出する。取得したデータは相互相関信号といえるので、再構築波形の強度分布は単に光スペクトル強度を遅延時間ごとに並べることで求めることができる。また、各遅延時間 τ の光スペクトルの中心波長を再構築波形の瞬時波長(周波数角周波数 ω)とすると、位相 ϕ は $\Delta\phi/\Delta\tau = \omega_0 - \omega$ より求めることができる。なお、 ω_0 は強度分布におけるピーク点の瞬時角周波数とする。

(3)まず数値解析により、パルス捕捉現象による NOLM を用いたスペクトログラム構築の動作の解析とデバイスの設計を行った。数値解析は、連立非線形シュレディンガー方程式をスプリットステップフーリエ法により解析した。

(4)次に、数値解析結果をもとに提案するスペクトログラム計測デバイスを実際に作成し、その動作を実証した。測定用の光源として、2 波長・2 超短パルス光を出力する光源を構築した。超短パルスレーザー光源(中心波長 1556 nm)から出力される超短パルス光を波長可変用の偏波保持光ファイバー(PMF, 50 m)に入射した。この PMF への入力強度や偏光方向を調整して、制御光の中心波長を長波長(1607 nm) に設定した。波長変換されなかった 1556 nm の成分を信号光とした。生成された制御光と信号光を PBC によって分波した。これらの波長関係は NOLM 内で群速度整合条件を満たす。遅延線により 2 つの光のタイミングを変化させて各入力ポートから NOLM へ入射した。

(5)実験により入出力特性を解析した。入力制御光と信号光に時間差を与えて、光スペクトルを測定し、スペクトログラムを構築した。また、波形の再構築を行った。

4. 研究成果

(1)まず、数値解析により提案するスペクトログラム測定技術を解析した。入力信号光には時間幅 2.7 ps、チャープ係数 1.1、中心波長 1556 nm、パルスエネルギー 7 pJ を用いた。入力制御光には時間幅 300 fs、中心波長 1607 nm、エネルギー 120 pJ を使用した。信号光と制御光の時間差を 0 ps とし、NOLM のファイバーループ長を 0 ~ 50 m で変化させた時の結果を図 2 に示す。ファイバーループ長に対して出力信号光の強度は増加した。次に、ファイバーループ長 5 m としたとき信号光と制御光の時間差を変化させて出力信号光の光スペクトルを測定した。遅延時間ごとに光スペクトルを並べて、スペクトログラムを構築した結果を図 3 に示す。負のチャープを持ったパルス波形が確認できる。また、スペクトログラムから入力波形の再構築を行った結果を図 4 に示す。本手法により得られた再構築波形は、入力信号光とよく一致した。ファイバーループ長を長くしても入力波形を再現できたが、ファイバーループ長が短いほど入力信号光と誤差が少ない傾向にあった。チャープした信号光波形の端では制御光との群速度差が生じるためだと考えられる。

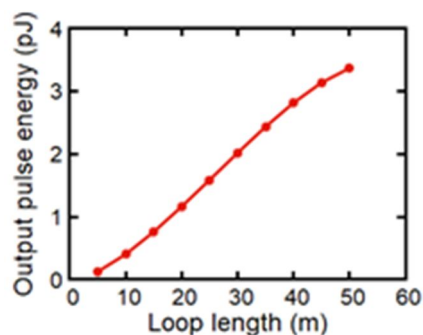


図 2 出力強度のループ長依存性

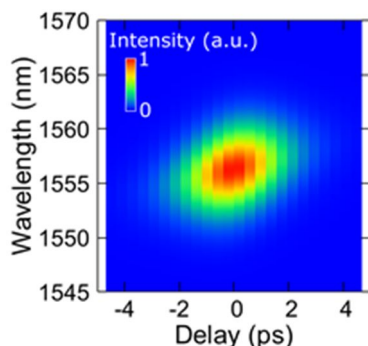


図 3 スペクトログラム(数値解析)

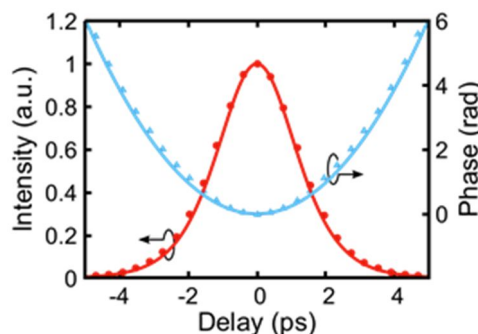


図 4 再構築波形(数値解析)、

プロット：解析結果、実線：入力波形(元の波形)

(2)次に実験により、開発した NOLM によるスペクトログラム計測技術の実証を行った。数値解析結果と同様に、ファイバーループ長 L を 5, 20, 50 m と長くすると出力強度が増加した。信号光と制御光の時間差を 200 fs ごとに变化させて出力信号光の光スペクトルを測定し、スペクトログラムを構築した。取得したスペクトログラムを図 5 に示す。ここでは、ファイバーループ長 5 m ではノイズに対して出力強度が弱かったため、ファイバーループ長を 20 m とした。

数値解析と同様に負のチャープを持ったパルス波形が確認できる。数値解析結果よりも光スペクトルのスペクトル幅は狭かった。スペクトログラムから波形の再構築を行った結果を図6に示す。再構築波形は、時間幅 2.7 ps でチャープ係数-1.1 の sech 型パルスの近似波形とよく一致する。信号光と制御光が重ね合わされる PBC 位置において、自己相関計により計測した信号光の時間幅は 2.6 ps であった。NOLM を時計回りに 20 m 伝播した後ではファイバーの波長分散により信号光の時間幅は 3.8 ps まで広がった。つまり、信号光と制御光が重ね合わされる PBC 位置での信号光の時間波形が本手法により測定されたと考えられる。したがって、提案手法により入力パルス光のスペクトログラム構築および波形の再構築に成功したと考えられる。

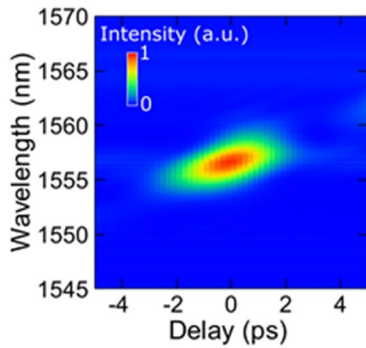


図5 スペクトログラム(実験)

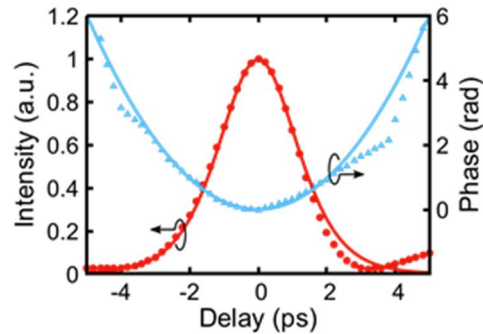


図6 再構築波形(実験)、
プロット：測定値、実線：近似線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Eiji Shiraki, Beta Noda, Norihiko Nishizawa
2. 発表標題 Analysis of pulse trapping of continuous wave in nonlinear optical loop mirror and all-optical switching
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白木英二、西澤典彦
2. 発表標題 非線形光ループミラー内のパルス捕捉現象と全光サンプリングの解析
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----