

相互相関周波数分解光ゲート法を用いた光ファイバにおける 超短パルス光の伝搬特性の解析

西澤 典彦, 後藤 俊夫

名古屋大学 工学研究科量子工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Experimental Analysis of Ultrashort Pulse Propagation along Optical Fibers Using the Technique of Cross-Correlation Frequency Resolved Optical Gating

Norihiko NISHIZAWA and Toshio GOTO

Department of Quantum Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603

(Received January 7, 2002)

Characteristics of ultrashort pulse propagation in optical fibers at the wavelength region of 1.55 μm are experimentally analyzed using the cross-correlation frequency resolved optical gating (X-FROG) technique. In the anomalous dispersive fibers, widely wavelength tunable femtosecond soliton pulse is generated. The spectrogram of almost transform limited soliton pulse around 2 μm is observed. In the dispersion shifted fibers, the wavelength tunable soliton pulse and anti-stokes pulse are generated. As the results of X-FROG measurement, it is clarified that the anti-stokes pulse is overlapped with the soliton pulse and trapped by the soliton pulse. In the highly nonlinear optical fibers, 1.2-2.1 μm ultra-widely broadened super continuum and 1.46-1.68 μm linearly chirped one are generated. The spectrograms of generated super continuum are observed. The phenomenon of pulse trapping is also observed in generated super continuum.

Key Words: Ultrashort pulse measurement, Nonlinear optical phenomena in optical fibers, Frequency resolved optical gating, Soliton, Super continuum

1. はじめに

超短パルス光を光ファイバに入射すると、非線形光学効果が顕著に現れる。近年我々は、受動モード同期超短パルスファイバレーザーを用いて光ファイバにおける超高速非線形光学現象の研究を行っている。これまで、光ファイバにおける非線形光学効果を用いて、波長1.55~2.1 μm まで広帯域に波長をシフトさせることのできるコンパクトな波長可変フェムト秒ソリトンパルス光源の開発に成功した^{1,2)}。又、短波長側にシフトするアンチストークスパルスの生成や、波長1.25~1.95 μm まで超広帯域に広がるスーパーコンティニューム光の生成にも成功している^{3,4)}。これらの光源は、システムのほぼ全てが光ファイバデバイスで構成されており、コンパクトで安定な実用的な光源である。

これまで、波長可変アンチストークスパルスの波長シフトのメカニズムはまだ明らかにされていなかった。又、超広帯域なスーパーコンティニューム光の生成過程にも未知の点が多い。上記の現象においては、光ファイバ中における超短パルス間の相互作用が寄与していることが考えられる。これまで光ファイバ中のパルス光の伝搬特性の解析には、時間波形やスペクトル波形の観測手

法が主に用いられてきた。しかし、これらの測定では、スペクトル成分の時間関係の情報が得られない。スペクトル成分の時間分布を測定することで、光ファイバにおけるパルススペクトル成分間の相互作用等の非線形現象を解析できることが期待される。

我々は、光ファイバにおける超短パルス光の伝搬特性を解析するために、相互相関周波数分解光ゲート法 (Cross-correlation frequency resolved optical gating; 通称X-FROG)測定装置を構築した⁵⁾。近年、FROG法は超短パルス光の測定手法として盛んに用いられている⁶⁾。この測定装置を用いると、測定結果を解析することで、パルス光の正確な時間波形と位相の分布を求めることができる。これまでFROGは超短パルス光の評価に主に用いられてきた。

今回我々は、被測定対称のパルス光を直接測定することのできるX-FROG法を用い、種々のファイバにおける波長1.55 μm 帯の超短パルス光の伝搬特性の解析を行った。今回は、これまでの測定系を改善し、より広帯域且つ高感度に測定ができるシステムを用いた。そして、測定結果を基に、特性の異なる種々のファイバにおいて、超短パルス光の伝搬の際に現れる現象を解析したので報告する。

2. 相互相関周波数分解光ゲート法(X-FROG)測定装置

Fig. 1に本研究で用いた相互相関周波数分解光ゲート法(Cross correlation frequency resolved optical gating; X-FROG)測定装置の構成を示す^{5,7)}。通常、超短パルス光の計測には、自己相関型のSHG-FROGが最も広く用いられる。しかし、SHG-FROG法では、時間的に対称なスペクトラムが観測されるため、実際のスペクトルの時間分布は観測波形を数値解析的に処理し、再構築しないと分からない⁶⁾。これに対しX-FROG法では、単一の参照パルスを用いることで、スペクトルの時間分布をほぼ正確に観測することができる。スペクトルの時間分布を観測する測定手法に、偏光ゲートFROG(polarization gating FROG; PG-FROG)があるが、PG-FROGには高いピークパワーの参照光が必要になる⁶⁾。X-FROGは高感度な検出が可能であるため、本研究のような低パワー領域での超短パルス応答を評価する実験では有効な手法である。

本研究では、光源に波長1.55 μm 帯で超短パルス光を出力する受動モード同期Er添加ファイバレーザー(IMRA femtolight)を用いた。この光源では繰り返し周波数約50 MHzで、時間幅約110 fsの超短パルス光が安定に出力される。この光源からのパルス光を励起光として被測定ファイバに入射し、ファイバからの出力をX-FROG測定装置を用いて観測することで、光ファイバにおける超短パルス光の伝搬特性を観測した。

まず、被測定ファイバから射出された光を二つに分岐し、コーナミラーを用いて光路差を調整した後、焦点距離150 mmの両凸レンズに入射する。そして、レンズの焦点に非線形結晶を配置し、二つの光を非平行に重ね合わせた。今回、非線形結晶には、広帯域に渡って位相整合が取れるよう、厚さ0.5 mmと薄い、タイプIのBBO結晶を用いた⁸⁾。生成される和周波信号光は分光器に入射され、出力を光電子増倍管(Photo multiplier tube, PMT)で検出した。又、参照光の光路にはチョッパーを配し、PMTの出力をロックインアンプを用いて増幅し、検出した。この検出手法は、超短パルス光の評価等に通常用いられるCCDカメラを用いた測定系と比較して、測定に時間がかかるものの、高い感度が得られるため、光ファイバにおける非線形過程などの低光エネルギー領域の計測に有

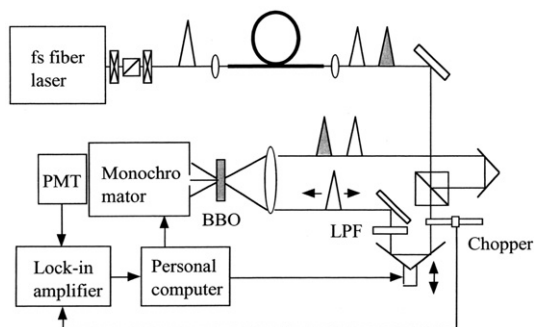


Fig. 1 Experimental setup of X-FROG measurement of ultrashort pulse propagation in optical fibers. LPF; low pass filter.

効である。コーナミラー、検出信号、分光器はそれぞれパーソナルコンピュータに接続し、自動計測システムを構築した。以下の章では、この測定手法を用いた光ファイバにおける超短パルス光の伝搬特性の解析結果について記述する。

3. 異常分散偏波保持ファイバにおける波長可変ソリトン生成の観測

まず、光ファイバにコア径が約6 μm と細く、異常分散を示す偏波保持ファイバを用いたときの実験結果を記す。

光ファイバの異常分散領域に超短パルス光を入射したとき、まずソリトン効果によるパルス圧縮によってスペクトルが広がる。そして、パルススペクトル内でのラマン増幅によって長波長側のスペクトルが短波長側のスペクトルによって増強され、長波長側にスペクトルが分裂し、新たなスペクトル成分が生成される^{9,10)}。この新しいパルススペクトルは光ファイバの伝搬に伴ってソリトン効果を受け、フーリエ変換限界のソリトンパルスに近づいていく。このソリトンパルスもパルススペクトル内でラマン散乱を受け、短波長側の成分が長波長側に徐々に移ることで中心波長が連続的に長波長側にシフトしていく。このとき、ソリトンパルスの波形は保たれたままである。このソリトンパルスの波長シフトの現象を、ソリトン自己周波数シフトと呼ぶ¹¹⁾。ソリトン自己周波数シフトにおける波長シフトの大きさは、ファイバ長や励起光の強度に依存して単調に変化する。そのため、これらのパラメータ、特に励起光強度を変化させることで、ソリトンパルスの波長を、連続に容易にシフトさせることができる^{1,2)}。

Fig. 2は、長さ110 mの細径偏波保持ファイバに110 fsの超短パルス光30 mWを結合したときの、ファイバ出力におけるスペクトルの測定結果を表している。波長1.55 μm の励起光の長波長側に三つの波長可変ソリトンパルスが生成されている。波長2 μm 近傍にあるソリトンパルスが最初に励起光から分離したソリトンパルスである。ペDESTアルのない、ほぼトランスフォームリミットな sech^2 型の

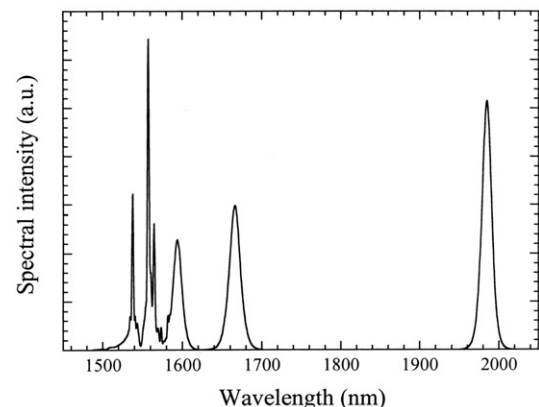


Fig. 2 Optical spectra observed from 110 m of diameter reduced type polarization maintaining fiber with anomalous dispersion.

ソリトンパルスが生成されている。スペクトル幅は半値全幅で14.5 nmである。このソリトンパルスの波長は励起光強度の変化に伴って、連続的にシフトする。これまで、波長1.55 μm ~2.03 μm まで広帯域にシフトするソリトンパルスを生成することに成功している²⁾。波長1.665 μm にあるソリトンパルスは、1回目のパルス分裂の際にソリトンパルスに変換されなかった残りの励起光から、その後分裂した2つ目のソリトンパルス、波長1.595 μm にあるのは、最後に分裂した3つ目のソリトンパルスである。ファイバへの入射光にファイバの特性と合ったソリトンパルスを用いると、入射パルスのほぼ全てが波長可変ソリトンパルスとなり、単一のソリトンが広帯域にシフトしていく現象を観測することができる¹³⁾。

Fig. 3は、最も長波長にシフトしたソリトンパルスについて、X-FROG装置を用いて観測したスペクトログラムを表している。参照パルスには、波長フィルタを用いて抽出した最長波長のソリトンパルスを用いた。そのため、このソリトンパルスの観測波形については、自己相関型のFROG波形になっている。図のように、ベDESTALのない綺麗なスペクトログラムを観測することができた。この図から時間波形の半値全幅は280 fsであり、対応する時間バンド幅積は0.31で、ほぼトランスフォームリミットのsech²型のパルスの値とほぼ一致した。今回の測定から、波長2 μm 近傍においてもほぼトランスフォームリミットなソリトンパルスになっていることを実験的に確認することができた。

このように、異常分散の細径偏波保持ファイバを用いることで、広帯域に渡ってほぼトランスフォームリミットに近い波長可変なフェムト秒ソリトンパルスを生成することができる。又、ソリトンパルスの波長は、入射光強度の変化に応じて非線形光学効果によって変化するため、光強度変調器を用いることで、電子制御型の超高速波長可変超短パルス光源を構成することができる¹²⁾。

4. 偏波保持分散シフトファイバにおける超短パルス光の伝搬特性

次に、光ファイバに励起光の波長帯の近くにゼロ分散

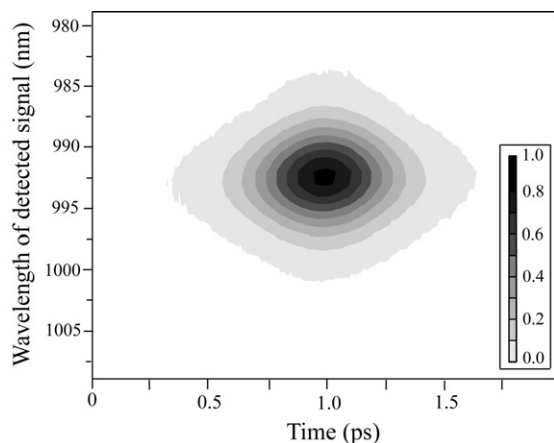


Fig. 3 Spectrogram of soliton pulse around 2 μm observed using X-FROG technique.

波長のある分散シフト型の偏波保持ファイバを用いたときの実験結果を記す。

超短パルス光の波長がゼロ分散波長近傍にあるときには、長波長側にシフトする波長可変ソリトンパルスに加えて、短波長側に連続的にシフトする波長可変アンチストークスパルスを生成することができる³⁾。

Fig. 4に分散シフトファイバ出力におけるスペクトルの測定結果を示す。この時の入射光強度は30 mWである。長波長側に二つのソリトンパルスが、短波長側に対応するアンチストークスパルスが生成されているのが分かる。励起光強度を変化させることによって、ソリトンパルスの波長は連続的に長波長側に、又、アンチストークスパルスは連続的に短波長側にシフトする。偏波保持型の分散シフトファイバでは、波長1.55~1.77 μm の帯域においてソリトンパルスを、又、波長1.3~1.5 μm の帯域においてアンチストークスパルスを生成することができる³⁾。更に後述の高非線形タイプ分散シフトファイバを用いると、更に広い帯域に渡って波長可変超短パルス光を生成することができる。

Fig. 5にX-FROGを用いた100 mの偏波保持分散シフトファイバ出力におけるスペクトログラムの測定結果を示す。参照パルスには、最長波長のソリトンパルスを波長フィルタで抽出して用いた。Fig. 3と同様に、ソリトンパルスはベDESTALのない、ほぼトランスフォームリミットな波形となっている。又、アンチストークスパルスは前端部がソリトンパルスの後端部と時間的に重なっている。他のファイバ長についての測定においても同様の時間関係になっていることが観測された⁵⁾。これらの結果より、ソリトンパルスとアンチストークスパルスが光ファイバ中において時間的に重なって伝搬していることが明らかになった。

最近まで、アンチストークスパルスの波長シフトのメカニズムはまだ明らかにされていなかった。筆者らの測定の結果から、アンチストークスパルスの波長シフトは、時間的に重なっているソリトンパルスによって誘起されていることが考えられる。先に、筆者らは分散シフトファイバにおける超短パルス光入射時のパルスの分裂過程を、X-FROGを用いて初めて観測した⁵⁾。更に、最近、筆者らは異常分散領域の超短ソリトンパルスによって、正常分散領域のパルス光が捕捉され、共に重なって

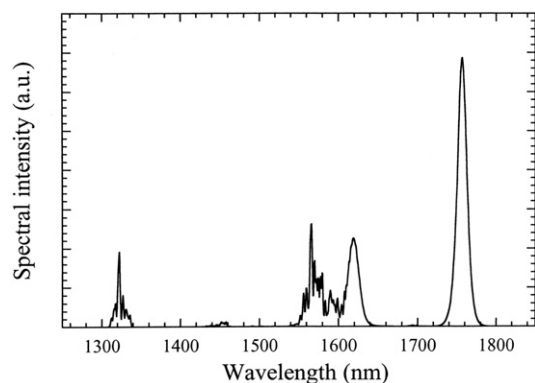


Fig. 4 Optical spectra from 100 m of polarization maintaining dispersion shifted fiber.

伝搬していく現象を初めて見出した¹³⁾。

パルス捕捉のメカニズムは以下のように説明できる。まず、ソリトンパルスの高いピーク強度によって屈折率の壁が誘起される。そのため、被捕捉パルスはソリトンパルスを追いつくことができず、相互位相変調によって短波長側にシフトされる。ソリトンパルスはソリトン自己周波数シフトによって、徐々に長波長側にシフトしていく。このとき、ソリトンパルスの波長は異常分散領域にあるため、群速度は減少していく。そのため、ソリトンパルスは捕捉パルスと度々重なり、捕捉パルスはそのたびに相互位相変調を受け、更に短波長側にシフトしていく。このとき捕捉パルスの波長は正常分散領域にあるため、捕捉パルスの群速度が減少し、二つのパルスの群速度は釣り合っていく。

正常分散ファイバにおけるアンチストークスパルスの波長シフトは、このソリトンパルスによるパルス捕捉によるものであると考えられる。実際に二つのパルス光を別個に用意し、ファイバ中で捕捉された状態をX-FROGで観測しても、Fig. 5と同様なスペクトログラムが観測された¹⁴⁾。又、連立非線形シュレディンガー方程式を用いた数値解析によって、実験結果と同様なパルス捕捉の振る舞いを確認することができた¹⁴⁾。

アンチストークスパルスの生成のメカニズムは以下のように考えられる。まず、超短パルス光によって誘起される3次の非線形効果(自己位相変調, パラメトリック増幅)によって、スペクトルが広がる。そして、長波長側に生成されるソリトンパルスによって、短波長側のスペクトル成分が捕捉され、ソリトンパルスと同じ群速度で進むよう、(群速度整合が取れるよう)波長がシフトされる。ソリトンパルスの波長は伝搬に伴ってソリトン自己周波数シフトによって連続的に長波長側にシフトし、それに伴って、捕捉パルスの波長も連続的に短波長側にシフトしていく。

このように、X-FROGによる測定結果を基にした解析によって、アンチストークスパルスの波長シフトのメカニズムを初めて明らかにすることができた。

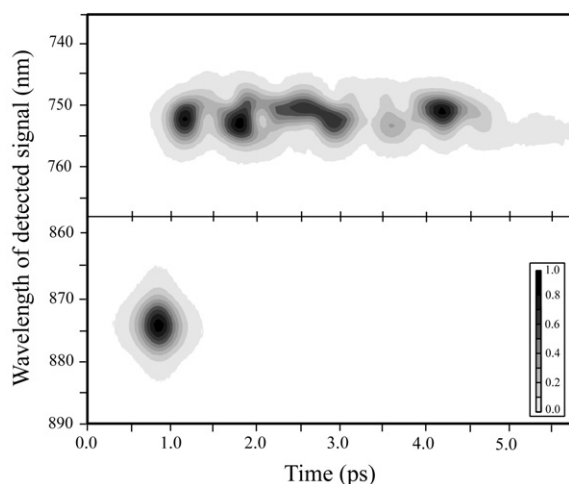


Fig. 5 Spectrogram of output pulses observed from 100 m of polarization maintaining dispersion shifted fiber using X-FROG technique.

5. 高非線形ファイバにおける超短パルス光の伝搬特性

次に、大きな非線形効果を得ることのできる高非線形ファイバにおける超短パルス光の伝搬特性を実験的に評価した。高非線形ファイバは、コア径が小さく、又コアにGeO₂を通常よりも多く添加したもので、大きな非線形効果を得ることができるファイバである¹⁵⁾。今回は励起パルス光の波長において正常分散を示すものと、零分散近傍のもの二種のファイバについて実験を行った。

Fig. 6は、正常分散を示す高非線形ファイバ出力のスペクトルの観測結果を表している。ファイバのパラメータは、波長1.55 μm において分散パラメータ $D = -12.7 \text{ ps/km/nm}$ 、モードフィールド径3.5 μm である。ファイバへの入射パワーは32 mW、対応するパルスのエネルギーは600 pJである。ファイバ長が1 mのとき、自己位相変調の効果によって、励起光スペクトルの両側にスペクトルのピークが現れる。その後、光スペクトルは徐々に平坦になり、ほぼ放物線上に広がる対称なスペクトルが生成される。ファイバ長が5 mのとき、波長1.46-1.68 μm まで広がるスーパーコンティニュームを生成することができた。帯域幅はピークから-10 dBのレベルで220 nmである。このスーパーコンティニューム光源は、波長多重光通信システムに用いられる光デバイスの評価などへの応用に有効であると考えられる。

Fig. 7は偏波保持高非線形分散シフトファイバを用いたときの光スペクトルの観測結果を表している。分散の大きさは波長1.55 μm において $D = +1.0 \text{ ps/km/nm}$ である。ファイバへの入射光強度は32 mWである。このファイバにおいては、ソリトン効果と高次の非線形効果の影響で、

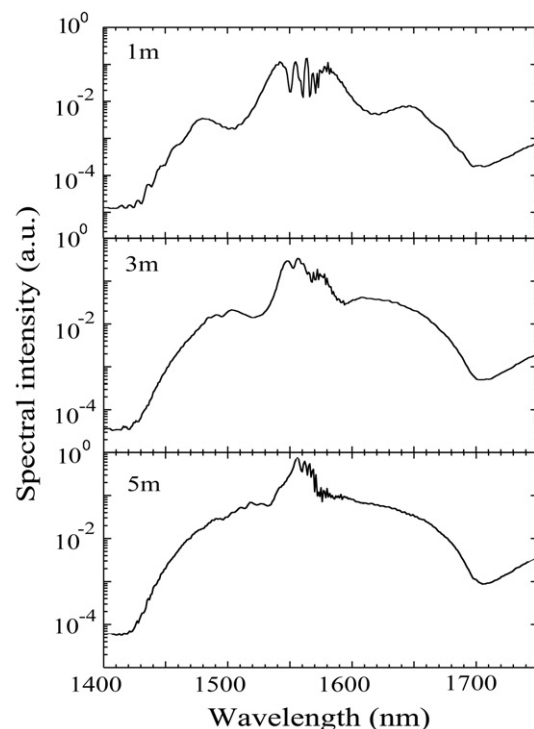


Fig. 6 Optical spectra of supercontinuum generated in highly nonlinear normal dispersion fibers.

超短パルス光を入射するとまずパルス圧縮が起こる。ファイバ長が1 mのとき、励起パルススペクトルの両側に複数のスペクトルのピークが生成される。その後、長波長側はソリトン自己周波数シフトによって更に長波長側にシフトして行く。そして、ファイバ長が長くなるに従って、スペクトル幅は増加し、スペクトル形状も平坦化して行く。ファイバ長が5-7 mまで増加した時、波長1.18-2.10 μm まではほぼ平坦に超広帯域に広がるスーパーコンティニュームを生成することができた。帯域幅は900 nmと超広帯域であり、これは光ファイバデバイスだけで構成されるシステムで生成されるスーパーコンティニュームでは最も広い帯域である。

分散パラメータ $D = +0.2 \text{ ps/km/nm}$ の偏波保持高非線形分散シフトファイバを用いた時には、より平坦なスーパーコンティニューム光が生成された。ファイバ長を7 m以上に増加して行くと、1.5 μm 付近にスペクトルの窪みが現れるものの、生成されるスーパーコンティニューム光の帯域は徐々に増加し、1.20-2.15 μm まで広がったスペクトルを生成することができた。

次に、X-FROGを用いて生成されたスーパーコンティニューム光の観測を試みた。この測定においては、参照パルスは、レーザー出力の一部を分岐し、偏波保持型の分散シフトファイバに入射して生成した⁴⁾。

Fig. 8は正常分散を示す高非線形ファイバからの出力パ

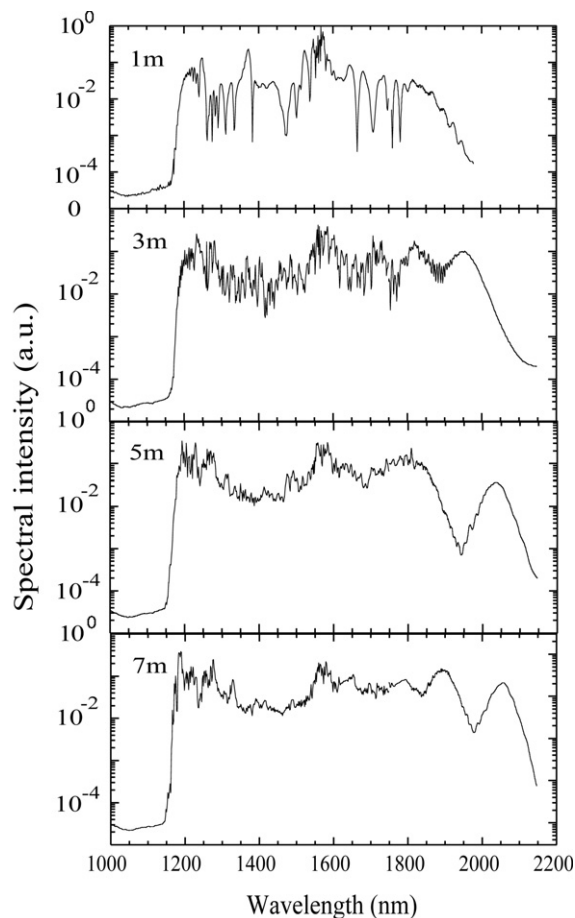


Fig. 7 Optical spectra of super continuum generated in polarization maintaining highly nonlinear dispersion shifted fibers.

ルスの観測波形を表している。ファイバ長が1 mの時、自己位相変調の効果によって励起パルス成分に対しほぼ対称に二つのピークが生成される。その後、波長分散の影響によってそれらはほぼ線形に広がっていく。ファイバ長が5 mの時、時間幅は半値全幅で約4 ps、-10 dBレベルで8 psである。

Fig. 9は、偏波保持高非線形分散シフトファイバ出力の観測波形を表している。ファイバ長が1 mの時、複数のスペクトルのピークが非対称に生成され、その後、波長分散の影響によって徐々に放物線状に広がっていく。ファイバ長が5 mの時、長波長側にはソリトンパルスが生成されているのが分かる。短波長側にはアンチストークスパルスが生成され、それぞれソリトンパルスの後端部に重なっている。Fig. 5と同様にして、この波形から、アンチストークスパルスはソリトンパルスによって捕捉されているのが分かる¹³⁾。

高非線形分散シフトファイバが長尺になると、励起光波長の短波長側に大きな窪みが現れてくる^{4,16)}。これはファイバ長の増加に伴って、ソリトン自己周波数シフトによって長波長側にシフトするソリトンパルスによって、短波長側のスペクトル成分が捕捉され、更に短波長側にシフトしていく結果と考えられる。又、今回は入射光強度の大きな領域で実験を行ったため、初期の非線形

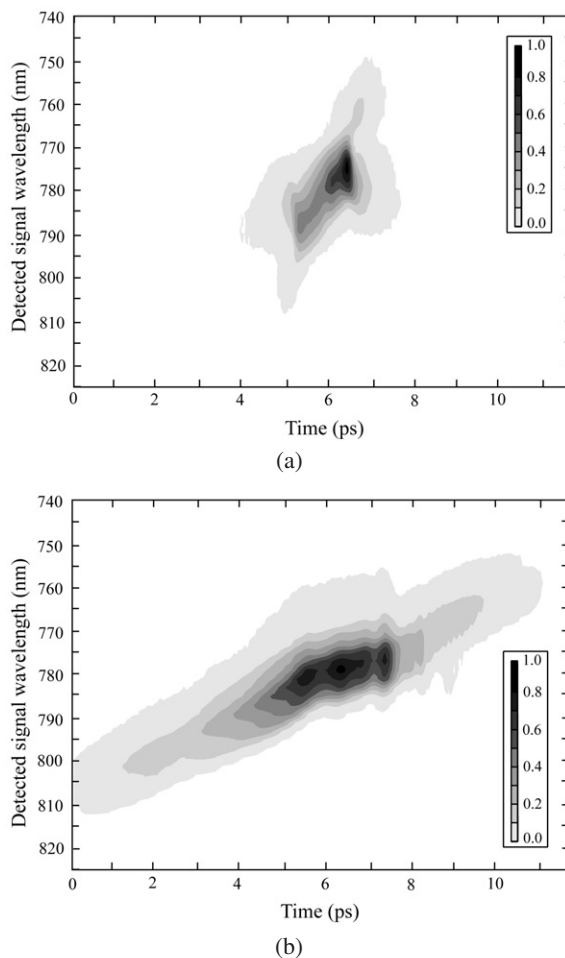


Fig. 8 Spectrogram observed for highly nonlinear normal dispersion fiber using X-FROG technique when the fiber lengths are (a) 1 m and (b) 5 m.

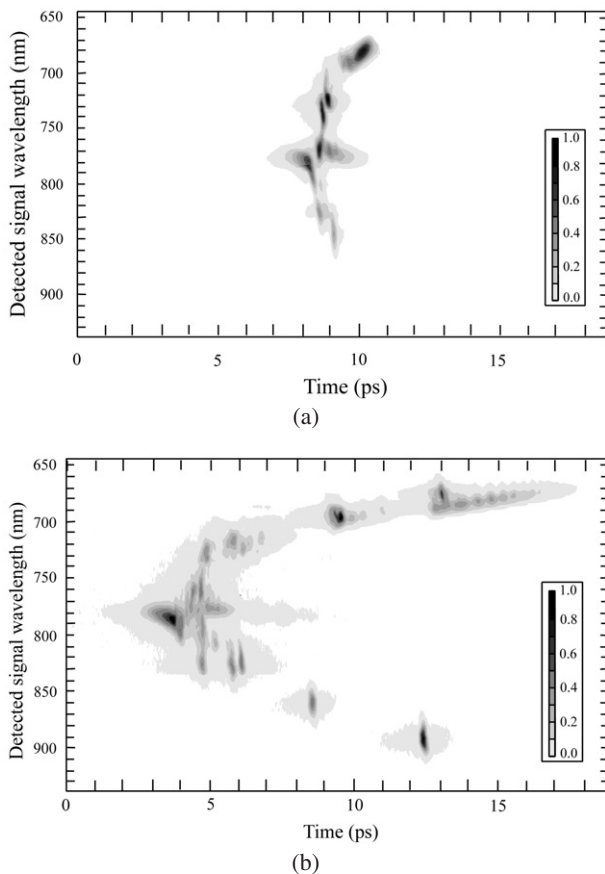


Fig. 9 Spectrogram observed for polarization maintaining highly nonlinear dispersion shifted fiber using X-FROG technique when the fiber lengths are (a) 1 m and (b) 5 m.

過程においてスペクトルが短波長側に大きく広がり、短波長側のスペクトルのシフトはあまり見られなかった。入射光強度を減衰させると、高非線形分散シフトファイバにおいても、パルス捕捉によるアンチストークスパルスの波長シフトを観測することができる^{4,16)}。

6. まとめ

本研究では、X-FROG計測法を用いて種々の光ファイバにおける超短パルス光の伝搬特性を解析した。X-FROGを用いると、光スペクトルの時間分布を高時間分解に直接観測することができる。これまで、FROGは超短パルス光の観測に主に用いられてきたが、本研究ではFROGを用いて光ファイバにおける超短パルス光の伝搬特性の解析を行った。

まず、異常分散ファイバではソリトン自己周波数シフトによって、励起光の長波長側に波長可変フェムト秒ソリトンパルス光を生成することができる。X-FROGによって、波長 $2\ \mu\text{m}$ 近傍でもほぼトランスフォームリミットなソリトンパルスが生成されていることが観測された。

次に、分散シフトファイバにおける超短パルス光の伝搬特性を解析した。励起パルスの波長が零分散近傍にあるとき、長波長側に生成される波長可変ソリトンパルスに加えて、短波長側に波長可変アンチストークスパルス

を生成することができる。励起光強度の増加に伴って、ソリトンパルスは長波長側に、アンチストークスパルスは短波長側に連続にシフトして行く。X-FROGによる観測によって、アンチストークスパルスはソリトンパルスの後端部に重なって伝搬しているのが観測された。これらの結果から、アンチストークスパルスはソリトンパルスによって捕捉され、シフトしていくことが明らかになった。

次に、高非線形ファイバにおける超短パルス光の伝搬特性の解析を行った。まず、正常分散の高非線形ファイバでは、線形にチャープする約 $220\ \text{nm}$ のスーパーコンティニュームを生成することができた。又、分散シフトファイバでは、 $1.2\sim 2.1\ \mu\text{m}$ まで超広帯域に広がるスーパーコンティニューム光を生成することができた。これは、光ファイバデバイスのみで構成されるシステムで生成されたスーパーコンティニュームでは最も広帯域なものである。X-FROGによる観測によって、生成されたスーパーコンティニューム光のスペクトログラム波形を観測することができた。又、分散シフトファイバにおいて生成されたスーパーコンティニューム光においては、ソリトンパルスによって、短波長側の成分が捕捉されている現象が起きていることを観測することができた。

謝 辞

本研究で用いた高非線形ファイバは住友電工(株)の大西氏、奥野氏、平野氏にご試供頂きました。又、スーパーコンティニューム光の生成については、アイシン精機(株)の吉田氏、永井氏にご議論頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) N. Nishizawa and T. Goto: IEEE Photon. Technol. Lett. **11** (1999) 325.
- 2) 西澤 典彦, 後藤 俊夫: レーザー研究 **29** (2001) 84.
- 3) N. Nishizawa, R. Okamura, and T. Goto: Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) L409.
- 4) N. Nishizawa and T. Goto: Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) L365. (Express Letter)
- 5) N. Nishizawa and T. Goto: Opt. Express **8** (2001) 328.
- 6) R. Trebino, K. W. DeLong, D. N. Fittinghoff, J. N. Sweetser, M. A. Krumbiegel, B. A. Richman, and D. J. Kane: Rev. Sci. Instrum. **68** (1997) 3277.
- 7) S. Linden, H. Giessen, and J. Kuhl: Phys. Stat. Sol. **206** (1998) 119.
- 8) P. O'Shea, M. Kimmel, X. Gun, and R. Trebino: Opt. Express **7** (2000) 342.
- 9) G. P. Agrawal: Nonlinear fiber optics, 3rd edition, (Academic Press, San Diego, 2001).
- 10) B. Zysset, P. Beaud, and W. Hodel: Appl. Phys. Lett. **50** (1987) 1027.
- 11) F. M. Mitschke and L. F. Mollenauer: Opt. Lett. **11** (1986) 659.
- 12) T. Hori, N. Nishizawa, H. Nagai, M. Yoshida, and T. Goto: IEEE Photon. Technol. Lett. **13** (2001) 13.
- 13) N. Nishizawa and T. Goto: Opt. Lett. **27** (2002) 152.
- 14) N. Nishizawa and T. Goto: CLEO 2002, CThE5, 456.
- 15) T. Okuno, M. Onishi, T. Kashiwada, S. Ishikawa, and M. Nishimura: IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron. **5** (1999) 1385.
- 16) N. Nishizawa and T. Goto: IEEE J. Selected. Topics Quantum Electron. **7** (2001) 518.