

# パルス捕捉を用いた超高速全光スイッチング

西澤 典彦

## Ultrafast All Optical Switching Using Pulse Trapping

Norihiko NISHIZAWA

A novel phenomenon of pulse trapping by ultrashort soliton pulse across zero dispersion wavelength in optical fiber is discovered. An optical pulse in normal dispersion region is trapped by soliton pulse in anomalous dispersion region and they copropagate along the fiber. The characteristics of this pulse trapping phenomenon are analyzed and its mechanism is clarified. Then, an ultrafast all optical switching using pulse trapping is proposed and 1 THz ultrafast all optical switching is demonstrated. From the results of numerical analysis, it is predicted that we can demonstrate about 2 THz ultrafast all optical switching using pulse trapping.

**Key words:** all optical switching, ultrashort pulse, nonlinear fiber optics, soliton, optical fibers

光ファイバーは、それを構成している熔融石英の非線形性がそれほど大きくないものの、小さなコアの内部に長距離にわたって光を閉じこめることができるため、最も有効な非線形光学デバイスのひとつである。近年、高非線形ファイバーやフォトニッククリスタルファイバー・微細構造ファイバー等が開発され、得られる非線形係数は大きく増加してきている<sup>1,2)</sup>。そのような高非線形ファイバーと超短パルス光源を用いると、非線形光学効果を顕著に得ることができる。

これまでに筆者らは、超短パルスファイバーレーザーと高非線形ファイバーを用いて、広帯域波長可変超短パルス光や超広帯域スーパーコンティニューム光の生成に成功してきた<sup>3-5)</sup>。これらの光源は、光通信・光計測等の分野において、非常に有用な光源である。また、現在、ファイバーレーザーや光ファイバーと超短パルス光を用いた研究が世界的にも大きなトピックになっている。

光ファイバー中で光パルスが重ね合わさると、相互作用現象が誘起される。1989年 Islam らは、複屈折ファイバーにおいて、2つの直交に偏光した基本ソリトンパルス間のパルス捕捉現象であるソリトン捕捉を見いだした<sup>6)</sup>。その

後、Islam はこのソリトン捕捉を用いて、ソリトンゲートといわれる手法を用いた光制御を試みている。近年、筆者らは複屈折ファイバーにおいて、超短ソリトンパルスによる捕捉パルスの生成という新しい現象を見いだした<sup>7)</sup>。ここでは、超短ソリトンパルスが直交するパルス光を捕捉し、ソリトン自己周波数シフトによるソリトンパルスの長波長側への波長シフトに伴って捕捉パルスの波長も長波長側にシフトされ、かつソリトンパルスによるラマン利得によって捕捉されたパルスが増幅されていく。この現象を用いると、時間的に重なった2色の超短パルス対を生成することができる。これらの現象は、異常分散領域の直交偏光パルス間の捕捉現象である。

近年、筆者らは、異常分散領域における超短ソリトンパルスによる正常分散領域のパルス光の捕捉現象をはじめて見いだした<sup>8,9)</sup>。捕捉パルスの波長は群速度整合を満たすようにシフトされ、ソリトンパルスと捕捉パルスは時間的に重なって光ファイバーを伝搬していく。パルス捕捉の現象は、正常分散領域のパルス光の波長制御や全光スイッチングに有効であることが期待される。

さらに、筆者らはこの正常分散領域のパルス光の捕捉現

名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻量子工学講座 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町) E-mail: nishizawa@nuee.nagoya-u.ac.jp

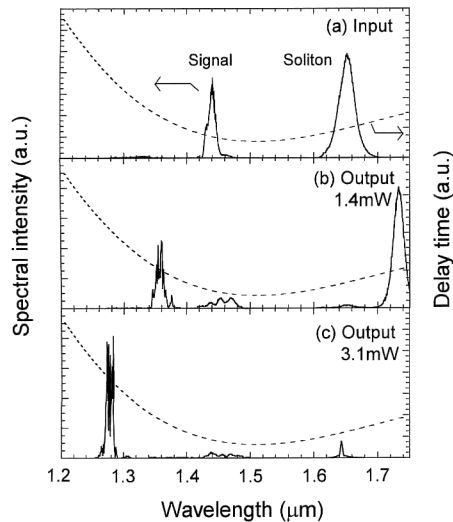


図1 パルス捕捉におけるスペクトルの変化. 点線は, 光ファイバーにおける波長分散による群遅延を表している. ソリトンパルスによって信号パルスが捕捉され, 群速度整合を満たすよう波長シフトし, とともに伝搬していく. (c) では, ソリトンパルスは測定範囲を超える  $1.88 \mu\text{m}$  まで波長がシフトしている.

象を用いた, 超高速全光スイッチングを考案した<sup>10)</sup>. 異常分散領域のソリトンパルスを用いて, 正常分散領域における高繰り返し信号パルス列から任意のパルスを捕捉する. この手法では, 数 m の長さのファイバーと波長フィルターを用いて, 超高速全光スイッチングを行うことができる. これまでに, 1 THz のパルス列に対する超高速全光スイッチングを実現することに成功している.

本稿では, 筆者が見いだしたパルス捕捉の現象と, それを用いた超高速全光スイッチングについて概説する.

## 1. パルス捕捉

超短パルス光を光ファイバーのゼロ分散波長近傍に入射させると, 長波長側にシフトする波長可変ソリトンパルスと, 短波長側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<sup>4)</sup>. ソリトンパルスは, ソリトン自己周波数シフトによって長波長側へシフトする. しかし, アンチストークスパルスの短波長側への波長シフトのメカニズムはこれまで未知であった.

筆者は, ソリトンパルスとアンチストークスパルスの間の相互作用を調べるために, ソリトンパルスとアンチストークスパルスをそれぞれ別個に生成し, 光ファイバー中で時間的に重ね合わせて相互作用を観測する実験を行った<sup>9)</sup>. その結果, 異常分散領域における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, ファイバー中とともに伝搬していく, 新しいパルス捕捉の現象を見いだし

た. このパルス捕捉の現象が, アンチストークスパルスの波長シフトのメカニズムであると考えられる.

図1は, パルス捕捉における光スペクトルの変化を表している. 中心波長  $1.65 \mu\text{m}$ , 時間幅 110 fs のソリトンパルスと, 中心波長  $1.44 \mu\text{m}$ , 時間幅 2 ps の信号パルスを偏光を合わせて入射させ, 偏波保持分散シフト高非線形ファイバー (PM-HN-DSF) 中で重ね合わせる. 図中の点線は, PM-HN-DSF における波長分散による群遅延曲線を表している. PM-HN-DSF の入射端において, ソリトンパルスと信号パルスの群速度がほぼ同じになるように波長を設定している. PM-HN-DSF の長さは 150 m である.

ファイバー中でソリトンパルスと信号パルスが重なったとき, 2つのパルスの群速度がほぼ等しい場合には, 信号パルスはソリトンパルスによって捕捉され, 2つのパルスは時間的に重なって光ファイバーを伝搬していく. このとき, ソリトンパルスはソリトン自己周波数シフトによって長波長側に連続的にシフトしていくが, 捕捉パルスは, 波長シフトをするソリトンパルスと群速度整合がとれるよう短波長側にシフトしていく.

図1(b)は, PM-HN-DSF の入力端において, ソリトンパルスの光強度が  $1.4 \text{ mW}$  のときの出力パルスの光スペクトルを表している. 入射したソリトンパルスはほぼ100%長波長側にシフトし, また信号パルスも高い効率で捕捉され, ソリトンパルスと群速度整合が合うような波長に短波長シフトしているのがわかる. 図1(c)では, ソリトンパルスの光強度を  $3.1 \text{ mW}$  まで増加したときの出力光のスペクトルを表している. ソリトンパルスの光強度が増加するに従って, ソリトンパルスの波長は連続的に長波長側へ, また捕捉パルスの波長は短波長側へとシフトしていく. この場合, ソリトンパルスの中心波長は  $1880 \text{ nm}$  まで長波長シフトし, 捕捉パルスの中心波長は  $1275 \text{ nm}$  に短波長シフトしている. ソリトンパルス, 捕捉パルスとも大きな波長シフトが観測された. 群速度整合は, この光強度の条件でも満たされている. この実験において, ソリトンパルスの強度が  $4 \text{ mW}$  のときに, ソリトンパルスの波長は  $1.65$  から  $1.95 \mu\text{m}$  まで, また捕捉パルスの波長は  $1.45$  から  $1.25 \mu\text{m}$  までシフトした. また, ソリトンパルスをオフにしたときには, 捕捉パルスの波長は入射時の波長へと戻った.

次に, 厳密な連立非線形シュレーディンガー方程式を用いて, パルス捕捉の数値解析を行った. 二次および三次の波長分散, 自己・相互位相変調, 自己急峻化, そしてラマン散乱の影響を考慮した. 光ファイバー中での超短パルス光の伝搬は, スプリットステップフーリエ法を用いて計算

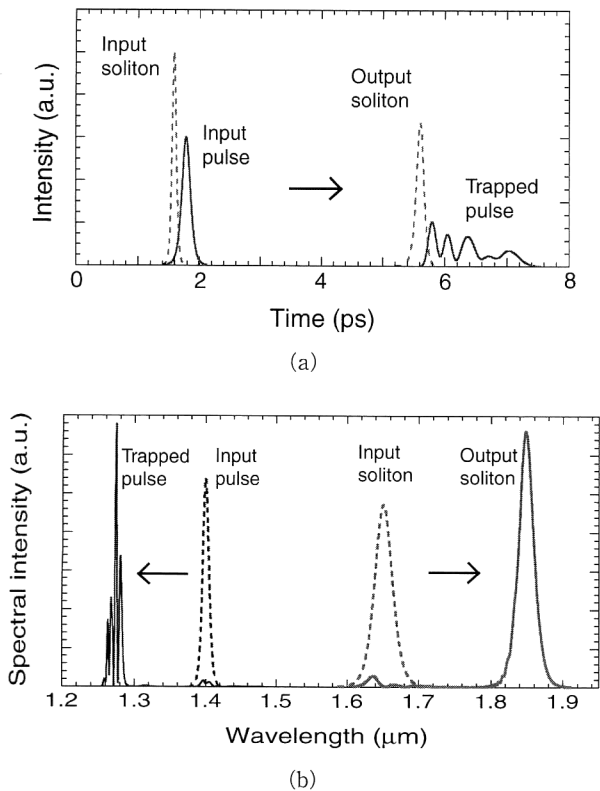


図2 パルス捕捉の数値解析結果。(a) 時間領域、(b) スペクトル領域。2つのパルスが波長シフトをしながら時間的に重なって、ともに伝搬していくのがわかる。

した。図2(a)は、パルス捕捉におけるパルス光の時間波形の変化の数値解析結果を表している。入射パルスには、 $\text{sech}^2$  型のパルスを仮定した。パルスの伝搬においては、ソリトンパルスの群速度はソリトン自己周波数シフトによる長波長シフトに伴い、波長分散の影響によって単調に減少していく。信号パルスがソリトンパルスと重なるとき、信号パルスはソリトンパルスによって誘起される高い屈折率の壁にぶつかり、その壁を越えることができない。いいかえれば、信号パルスはソリトンパルスによって相互位相変調を受けることによって捕捉され、ソリトンパルスと時間的に重なって伝搬していく。捕捉パルスの前端はいつもソリトンパルスの後端とほぼ重なっており、時間波形は若干複雑になっている。

図2(b)は、パルス捕捉におけるスペクトルの変化を表している。パルスの伝搬の初期過程では、信号パルスはソリトンパルスによる相互位相変調によって短波長側にシフトする。また、パルスの伝搬に伴って、ソリトンパルスはソリトン自己周波数シフトによって長波長側にシフトし、捕捉パルスはソリトンパルスと群速度整合がとれるよう、短波長側にシフトする。伝搬距離が増加するにつれて、2つのパルスの波長シフトの大きさは単調に、ほぼ連続的に増加

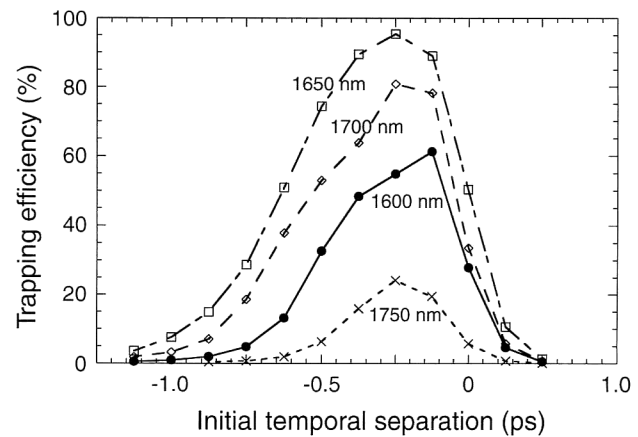


図3 捕捉効率の初期時間差依存性。最大の変換効率を得られるとき、初期時間差の半値全幅は時間幅 700 fs、波長帯域幅約 100 nm であり、選択的な超高速全光スイッチングに適しているのがわかる。

していく。数値解析の結果、ソリトン自己周波数シフトとパルス捕捉の両方について、ほぼ 100% の変換効率を得られた。数値解析の結果は、実験結果とよく一致した。これらの解析の結果から、パルス捕捉のメカニズムは、長波長側に波長シフトをし続けるソリトンパルスによって、被捕捉パルスが連続的に相互位相変調を受け続けるためであるということがわかった。

図3は、初期時間差の関数で表した捕捉効率の変化を示す。ソリトンパルスと信号パルスには、100 fs のフーリエ変換限界の  $\text{sech}^2$  型パルスを仮定した。信号パルスの波長は  $1.45 \mu\text{m}$  とした。励起パルスの波長は  $1.60 \sim 1.75 \mu\text{m}$  の間で変化させた。光ファイバーのパラメータは、実験やこれまでの数値解析のものと同じとした。励起パルスの波長が  $1.65 \mu\text{m}$  で群速度整合が満たされるとき、最大 95% の捕捉効率を得られた。捕捉効率曲線の半値全幅は 0.7 ps であった。また、捕捉効率 50% を超える波長帯は、 $1.6 \sim 1.7 \mu\text{m}$  の間の約 100 nm の帯域であることがわかる。この結果より、パルス捕捉を用いると、0.7 ps の時間領域の中の、100 nm の波長帯域内にあるパルスのみ捕捉できることがわかる。

## 2. パルス捕捉を用いた全光スイッチング

図3の結果から、パルス捕捉を用いると、超高速な全光スイッチングが可能であることが期待される。そこで、筆者は、正常分散領域のパルス光の捕捉現象を用いた新しい全光スイッチングの手法を考案した<sup>10)</sup>。

図4は、パルス捕捉を用いた全光スイッチングの数値解析結果を表している。信号パルスには、時間間隔 1.5 ps の四連のパルス列を用いた。信号パルスの中心波長は 1.4

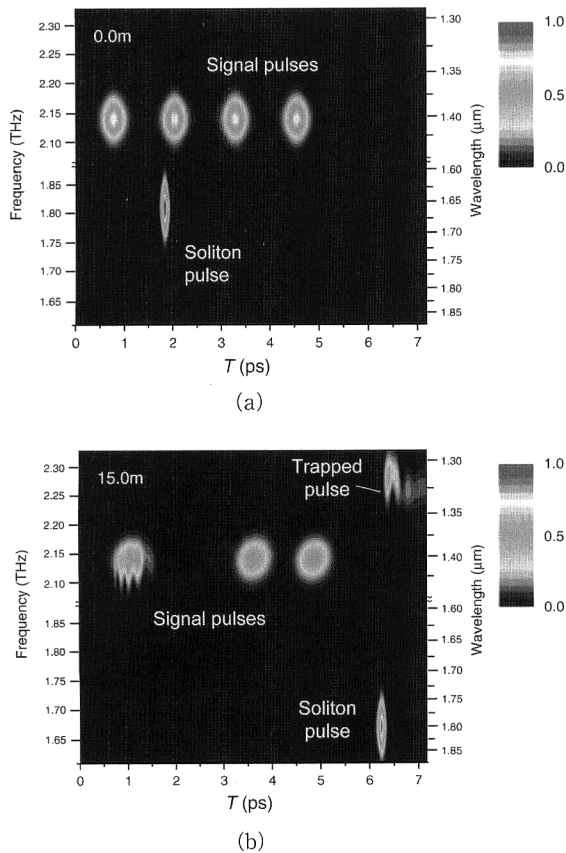


図4 パルス捕捉を用いた全光スイッチングのシミュレーション結果。(a) 入力, (b) 出力. 下側のソリトンパルスによって, 2 番目の信号パルスのみが捕捉され, 波長シフトをしながらともに伝搬していく。

$\mu\text{m}$  であり, それぞれの信号パルスの時間幅は半値全幅で 400 fs である. 制御パルスには, トランスフォームリミットなソリトンパルスを用いた. 中心波長は  $1.65 \mu\text{m}$  で, 時間幅は 100 fs である. 光ファイバーには, 実験で用いた PM-HN-DSF を仮定した. この数値解析では, ファイバーの入射端において, 2 目目のパルス (被捕捉パルス) の中心はソリトンパルスの中心から時間的に 250 fs 遅れているとした. この初期時間差は, 図 6 において最大の捕捉効率を得られる条件に対応する.

ソリトンパルスと 2 目目の信号パルスに群速度整合の条件が満たされるとき, 2 目目の信号パルスはソリトンパルスに捕捉され, 光ファイバーをともに伝搬する. ソリトンパルスの波長はソリトン自己周波数シフトによって長波長側にシフトし, 捕捉パルスはソリトンパルスによる相互位相変調によって短波長側にシフトする.

ソリトンパルスが 3 番目以降の信号パルスと重なったとき, ソリトンパルスはさらに長波長側に波長シフトしているため群速度整合が満たされず, 3 番目以降のパルスはソリトンパルスによって捕捉されない. そのため, ソリトン

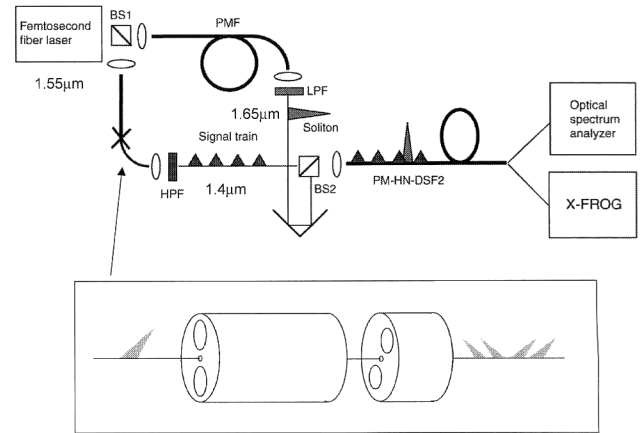


図5 パルス捕捉を用いた全光スイッチングの実験系. 1 つの超短パルスファイバーレーザーから, ファイバーの非線形性を用いて, 波長の異なる超短ソリトンパルスと四連の高繰り返し信号パルス列が生成され, 高非線形ファイバー中で重ね合わせられる. X-FROG: 相互相関周波数分解光ゲート法測定装置.

パルスによるパルス捕捉を用いると, 単一のパルスのみ捕捉することができる.

次に, 2 目目のパルスがないときの全光スイッチングのシミュレーションを行った<sup>10)</sup>. この場合, 3 番目と 4 番目のパルスはソリトンパルスと重なったときに相互位相変調を受け, スペクトル波形は明らかに変化するが, ソリトンパルスにはまったく捕捉されなかった. この解析の結果, 2 目目のパルスがあるときには高い捕捉効率でパルスが捕捉されるが, 2 目目のパルスがないときには, 何も捕捉されることが確認できた. クロストークは 20 dB 以下と見積もられた. このように, パルス捕捉を用いて高度な全光スイッチングを行うことができることがわかった.

次に, パルス捕捉を用いた全光スイッチングの実験を行った. 図 5 は実験系を示している. 光源には, 超短パルスファイバーレーザーを用いた. 出力は 2 つに分岐され, 異なる 2 つのファイバーに入射される. 一方は, 細径偏波保持ファイバーに入射され, ソリトンパルスが生成される. また, 他方は継続的に融着された偏波保持分散シフトファイバーに入射され, 信号パルス列を生成する. このファイバーでは, 1 段目のファイバーは同種の 2 段目のファイバーに, 複屈折軸を 45 度ずらして接続した. 1 段目のファイバーでは偏波保持ファイバーの複屈折によって, 直交偏光成分が独立に伝搬し, それぞれソリトンパルスとアンチストークスパルスを生成する. 2 段目のファイバーでは, 伝搬してきたパルスが複屈折によってさらに 2 つの偏光成分に分かれ, 四連のパルス列を生成することができる. PM-DSF の出力においては, 短波長通過フィルターを用いて生成されたアンチストークスパルス列のみを抽出し, 信号パ

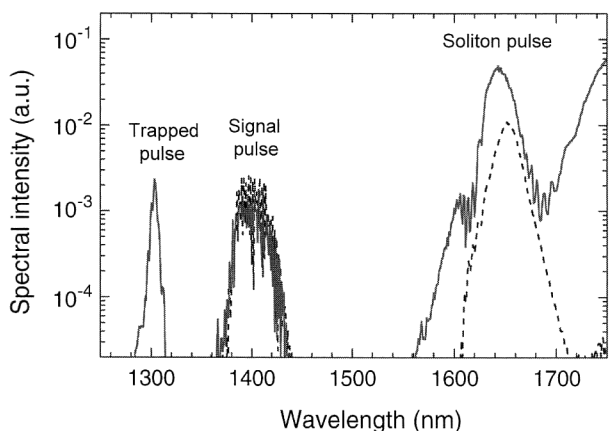


図6 パルス捕捉を用いた全光スイッチングにおけるスペクトルの変化。信号パルス列から捕捉されたパルスのみ大きく短波長シフトする。

ルス列として用いた。今回は、パルス間隔 1.5 ps および 1 ps の四連のパルス列を生成した。

生成した制御パルスと信号パルス列は、時間差を調整し、偏光を合わせて PH-HN-DSF2 に入射する。PM-HN-DSF2 の中で、パルス捕捉が誘起される。PM-HN-DSF2 の出力は、光スペクトルアナライザと相互相関周波数分解光ゲート法 (X-FROG) 測定装置を用いて観測した。

図6は、PM-HN-DSF2 の出力において観測したスペクトルを表している。光ファイバーの入力において、ソリトンと信号パルスの波長はそれぞれ  $1.65 \mu\text{m}$ 、および  $1.4 \mu\text{m}$  とした。また、信号パルスの平均光強度は  $60 \mu\text{W}$  とし、ソリトンパルスの光強度は  $0 \sim 1.8 \text{ mW}$  の間で変化させた。

光ファイバーにおける伝搬に伴って、ソリトンパルスの波長は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。信号パルスについては、入射端においてソリトンパルスと信号パルスとの初期時間差を合わせると、パルス列の中の任意の1つのパルスのみラマンシフトするソリトンパルスによって捕捉される。捕捉されたパルスは、ソリトンパルスと群速度整合の条件を満たすよう、短波長側にシフトする。図6において、捕捉パルスの波長は  $1300 \text{ nm}$  にシフトし、捕捉されないパルスの波長は変化しない。図6から、波長シフトの大きさが十分に大きいとき、カットオフ波長が  $1350 \text{ nm}$  程度の短波長通過フィルターを用いれば、 $20 \text{ dB}$  を超える非常に高い消光比を得ることができるのがわかる。捕捉パルスの波長シフトの大きさは、ソリトンパルスのファイバー入射強度を増加させることによって増加させることができる。

図7は、相互相関周波数分解光ゲート法測定装置<sup>11)</sup>を用いて観測した、パルス捕捉による全光スイッチングにお

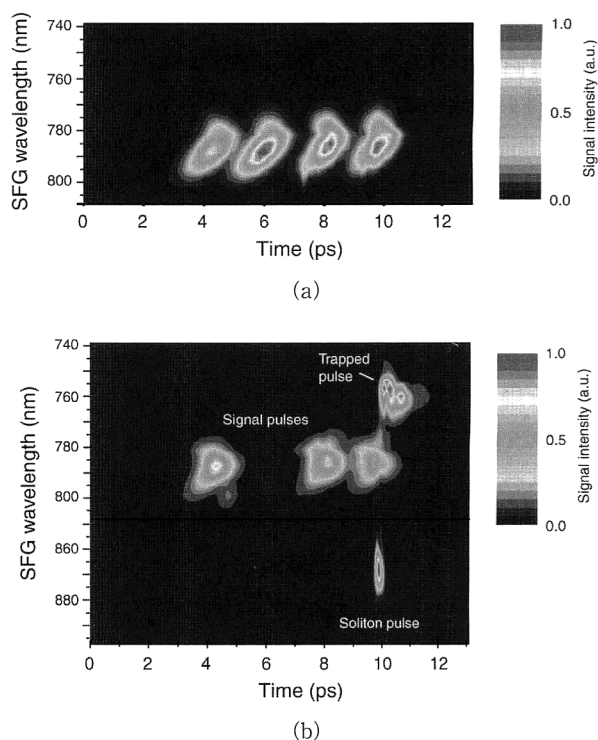


図7 相互相関周波数分解光ゲート法を用いて測定した、パルス捕捉による全光スイッチングの観測結果。(a) 非捕捉時、(b) 捕捉時。2つ目の信号パルスのみソリトンパルスにより捕捉され、短波長シフトをしながらともに伝搬していく。

る出力パルスのスペクトログラムの観測結果を表している。横軸は時間を、また縦軸は観測した和周波信号の波長をそれぞれ表している。パルス捕捉が起こらないとき、時間間隔 1.5 ps の四連のパルスが明瞭に観測された。正常分散の影響による線形チャープがみられるのがわかる。図7(b)は、ソリトンパルスによって2番目のパルスのみ捕捉されたときの出力パルスのスペクトログラムを表している。捕捉パルスはソリトンパルスとともに伝搬し、捕捉パルスの前端はソリトンパルスの後端と時間的に重なっている。また、捕捉パルスの波長は、相互位相変調によって短波長側にシフトしている。ほぼ 100% の大きな変換効率を観測することができた。ソリトンパルスと信号パルスとの初期時間差を調整することによって、パルス列の中から任意の単一のパルスのみを捕捉することができた。図6に示すように、捕捉パルスの光スペクトルが他の捕捉されていないパルスのスペクトルと大きく分離しているため、パルス列から捕捉されたパルスのみ抽出することができる。

ソリトンパルスは3番目や4番目のパルスとも重なるが、これらのパルスはソリトンパルスには捕捉されない。この結果は、図4の数値解析の結果と一致した。この結果

より、パルス捕捉を用いると、時間や波長の条件が満たされた、任意の単一のパルスのみ捕捉できることがわかる。

その後の実験により、筆者は最近、1 THzのパルス列(パルス間隔1 psの四連パルス列)に対する全光スイッチングにも成功した<sup>12)</sup>。また、CW光に対するパルス捕捉の解析も行い、超高速全光スイッチングの最大のスピードは約2 THzであると見積もることができた。

ゼロ分散波長を交差した超短ソリトンパルスによるパルス捕捉を用いた超高速全光スイッチングについて、これまでの研究を概説した。筆者は、異常分散領域の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る現象をはじめて見いだした。また、パルス捕捉を用いた超高速全光スイッチングを考案し、数値シミュレーションおよび実験の両面において、1 THzの超高速全光スイッチングを実現することに成功した。この手法では、パルス列から任意の単一のパルスのみを捕捉し、抽出することができる。

これまで、全光スイッチングについて、いくつかの手法が提案されてきた。それらと比較すると、パルス捕捉を用いた全光スイッチングは、非常に高い消光比、高い変換効率、そして低いクロストークといったすぐれた特性を有している。ソリトンパルスの強度を調整することによって、捕捉パルスの波長を調整することもできる。異常分散領域におけるパルス捕捉を用いた全光スイッチングは現在研究中である。

## 文 献

- 1) T. Okumo, M. Onishi, T. Kashiwada, S. Ishikawa and M. Nishimura: "Silica-based functional fibers with enhanced nonlinearity and their applications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **5** (1999) 1385-1391.
- 2) P. Petropoulos, H. Ebendorff-Heidepriem, V. Finazzi, R. C. Moore, K. Frampton, D. J. Richardson and T. M. Monro: "Highly nonlinear and anomalously dispersive lead silicate glass holey fibers," *Opt. Express*, **11** (2003) 3568-3573.
- 3) N. Nishizawa and T. Goto: "Compact system of wavelength tunable femtosecond soliton pulse generation using optical fibers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **11** (1999) 325-327.
- 4) N. Nishizawa, R. Okamura and T. Goto: "Widely wavelength tunable ultrashort soliton pulse and anti-stokes pulse generation for wavelengths of 1.32-1.75  $\mu\text{m}$ ," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) L409-L411.
- 5) N. Nishizawa and T. Goto: "Widely broadened super continuum generation using highly nonlinear dispersion shifted fibers and femtosecond fiber laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) L365-L367.
- 6) M. N. Islam, C. D. Poole and J. P. Gordon: "Soliton trapping in birefringent optical fibers," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 1011-1013.
- 7) N. Nishizawa and T. Goto: "Trapped pulse generation by femtosecond soliton pulse in birefringent optical fibers," *Opt. Express*, **10** (2002) 256-261.
- 8) N. Nishizawa and T. Goto: "Pulse trapping by ultrashort soliton pulses in optical fibers across zero-dispersion wavelength," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 152-154.
- 9) N. Nishizawa and T. Goto: "Characteristics of pulse trapping by use of ultrashort soliton pulses in optical fibers across the zero dispersion wavelength," *Opt. Express*, **10** (2002) 1151-1159.
- 10) N. Nishizawa and T. Goto: "Ultrafast all optical switching by use of pulse trapping across zero-dispersion wavelength," *Opt. Express*, **11** (2003) 359-365.
- 11) N. Nishizawa and T. Goto: "Experimental analysis of ultrashort pulse propagation in optical fibers across the zero-dispersion wavelength," *Opt. Express*, **8** (2001) 328-335.
- 12) N. Nishizawa and T. Goto: "Ultrafast all optical switching using pulse trapping by ultrashort soliton pulse," *IEICE Trans. Electron.*, **E87-C** (2004) 1148-1154.

(2004年5月31日受理)