

3 物理層実現技術・光信号処理

3 *Physical Layer Technologies / Optical Signal Processing*

3-1 光ファイバ非線形性を用いた光信号処理

3-1 *Optical Signal Processing using Fiber Nonlinearity*

カジサルワル アベディン

Kazi Sarwar Abedin

要旨

高繰り返し数の小型ピコ秒・フェムト秒パルス光源、非線形パルス整形を用いた波長変換器及び光ファイバの非線形効果を利用した超高速パルス・リタイマを実証した。筆者は、繰り返し数が 40 GHz のピコ秒パルスを、共振器長を短くするためにフォトニック結晶ファイバを用いたレーザによって生成した。また、モード同期レーザパルスのソリトン自己周波数シフトを 12.6 m 長のフォトニック結晶ファイバにおいて利用し、90 nm にわたって波長可能な 10 GHz フェムト秒ソリトンを発生させた。さらに偏波保存ファイバを用いて、非線形ファイバ中直交偏波制御パルスによって信号パルスのリタイミングが実現される点を最後に実証する。

We demonstrate compact high-repetition rate picosecond/femtosecond pulse sources, wavelength converters using nonlinear pulse shaping and ultrafast pulse retimers that are based on nonlinear effect in optical fibers. We generated picosecond pulses at a 40-GHz repetition rate from a laser that employs photonic crystal fiber for reducing the cavity length. Furthermore, we produce 10-GHz femtosecond solitons, tunable over a 90-nm range, by means of soliton self-frequency shift of the mode-locked laser pulses in a 12.6-m-long PCF. Finally, retiming of signal pulses by orthogonally polarized control pulses co-propagating using a polarization-maintaining fiber is also demonstrated.

[キーワード]

光非線形性, フォトニック結晶ファイバ, ソリトン, ファイバレーザ, 全光型信号処理
Optical nonlinearity, Photonic crystal fiber, Soliton, Fiber laser, All-optical signal processing

1 はじめに

光ファイバ内を強い光が伝播すると、光ファイバの屈折率がほぼ瞬間的に変化する。これを光カー効果といい、光通信の分野において広く応用されている。ファイバ内の屈折率は $n = n_0 + n_2 \cdot I(t, x, y)$ の式に従って変化する。ここに n_2 は非線形屈折率、 I は光学強度 (パワー/面積) である。こ

のような変化の結果、光の位相は $\phi_{NL} = \gamma P L_{eff}$ のように変化する。ここに L_{eff} は吸収損失の効果が存在する光ファイバの有効長、 P は光パワー、 γ は $\gamma = 2\pi n_2 / (\lambda A_{eff})$ で定義される非線形係数である。したがって、大きな非線形位相変化を短い距離で得るには非線形パラメータの大きい光ファイバを使用する必要がある。一般にこれを実現するには、非線形屈折率 n_2 が大きく、しかもコア

径が小さい特別設計のファイバが使用される。表 1 に、標準的なシリカファイバに比べて非線形屈折率が 2 桁以上大きくなるように作られたシリカ及び非シリカガラス製の光ファイバを示す。このように大きな非線形性と適切な分散を持つ光ファイバは、超高速通信の分野において様々な用途に使用できる。

本稿では光ファイバが有する非線形性の応用例として、ファイバレーザを用いた波長可変ピコ秒・フェムト秒パルスの生成、広波長域にわたる波長変換、そして光ファイバの非線形効果を利用した高繰り返し数パルスのリタイミングを取り上げる。特に高非線形フォトニック結晶ファイバ (photonic crystal fiber, PCF) を使った、偏波保存型モード同期のエルビウムファイバレーザについて説明する。このレーザは 1.55 μm の波長帯において約 1 ps 幅の安定したパルスを 10~40 GHz もの高い繰り返し数で発生する。10 GHz におけるモード同期パルスの波長が、高非線形フォトニック結晶ファイバにおける非線形ソリトン自己周波数シフト (self-frequency shift, SSFS) によって 100 nm の範囲にわたってシフトされた。さらに筆者は、偏波保存 (polarization maintaining, PM) ファイバにおける相互位相変調 (cross-phase modulation, XPM) によってピコ秒信号パルスの超高速パルス・リタイミングが実現することを実証する。同期した制御パルス列でドラッグする (引っ張る) ことにより、10 GHz のパルス繰り返し数において \pm 約 2 ps のパルス・リタイミングが見事に達成された。

表 1 非線形性の大きい光ファイバ

Material	n_2 m ² /W	Fiber structure	A_{eff} (μm^2)	γ ($\text{km}^{-1}\text{W}^{-1}$)
SiO ₂	4.9×10^{-20}	HNL-DSF	10	20
SiO ₂	2.7×10^{-20}	Holey Fiber	1.5	70
Bi ₂ O ₃	1.1×10^{-18}	Step Index	3.3	1360
As ₂ Se ₃	9.2×10^{-18}	Step Index	39	162
SF57	4.1×10^{-19}	Holey Fiber	3	956

2 高繰り返し数のピコ秒ファイバレーザ

高速光通信、光 A/D 変換及び光コンピューティングの分野では、ピコ秒のパルス幅と高い繰り返し数を持ち、タイミング・ジッタの小さい光パルスが強く求められる。エルビウム添加ファイバレーザのアクティブモード同期を開始し、ファイバ内部の非線形効果を利用することにより、数十 GHz から 100 GHz の繰り返し数及び 1530~1570 nm での波長可変性を持つ 1.55 μm 波長帯のピコ秒・サブピコ秒パルスが生成できる [1]~[3]。高繰り返し数 (10~40 GHz) においてピコ秒パルスが生成できるのは、共振器内部に設置した長さ数百メートルの異常分散ファイバ内でソリトン圧縮が生じることによる。

共振器内の非線形パルス圧縮に使用される光ファイバの波長分散パラメータ β_2 は、これまでかなり小さかった。ソリトン周期は $\pi \tau_0^2 / 2 \beta_2$ (τ_0 は 1/e-半値幅) に等しいため、パルス圧縮を実現するには 100 m 以上のファイバ長が必要になる。そのため異常分散の大きな高非線形光ファイバを用いることで非線形パルス圧縮に必要なファイバ長は大幅に低減されるものと期待される。モード同期ファイバリングレーザの概略図を図 1 に示す。36 m 長の共振器は、Er ドープ PANDA ファイバ、変調器、光アイソレータ、波長可変バンドパスフィルタ、出力カップラ及び偏波保存 PCF (PM-PCF) から成り立っている。PM-PCF は非線形係数が $39.5 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 、分散パラメータが $104 \text{ ps}^2/\text{nm}/\text{km}$ である。

発振器周波数を適切に調整することにより、レーザのモード同期が約 40 GHz の繰り返し数で実現された。出力パルスにおける光スペクトルの幅 (図 2a) は 2.69 nm であった。レーザはチャープを持つパルスを生成したが、これは 4 m 長の分散補償ファイバ (dispersion compensating fiber, DCF) を用いた外部チャープ補償によって相殺された。パルスの自己相関トレース (図 2b) からパルス幅 (FWHM) は 1.29 ps であることが示された。また、平均出力パワーは 14.4 mW であった。

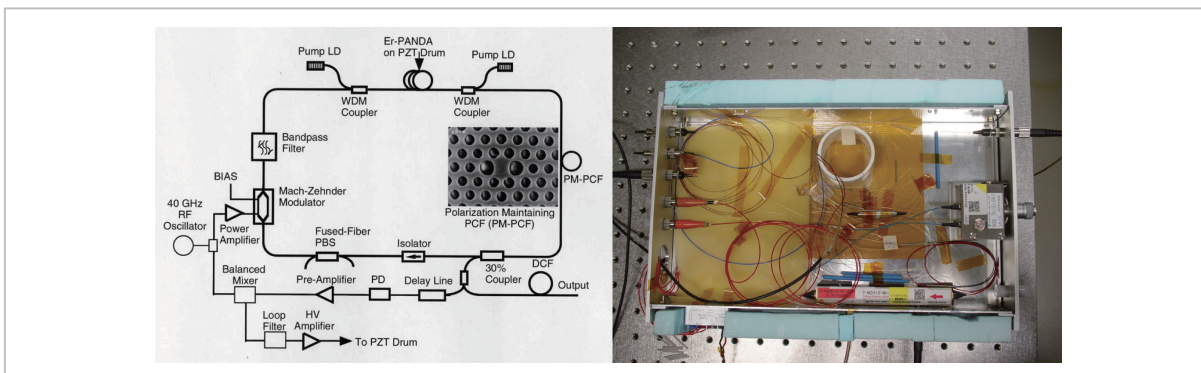


図1 繰り返し数 40 GHz のモード同期ファイバレーザの概略図

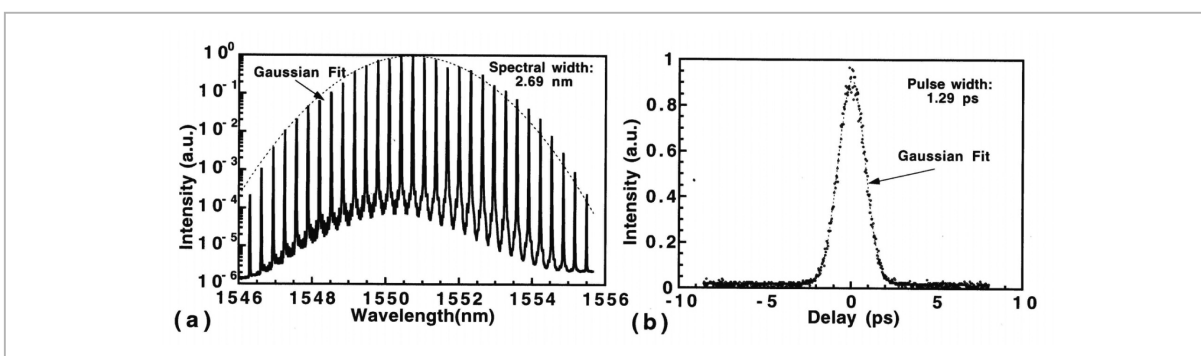


図2 出力パルス

a) 光スペクトルと b) 自己相関トレース

3 ソリトン自己周波数シフトを用いた波長変換

細いパルス幅、低ジッタ、低ドロップアウトのほかにパルスに望まれるもう一つの特徴は、波長可変性である。スーパーコンティニウム光発生[4]やソリトン自己周波数シフト (soliton self-frequency shift, SSFS)[5][6]といった光ファイバ内の様々な非線形過程を外部利用することにより、波長可変性をエルビウムの利得帯域を超えて拡張することができる。SSFSは異常分散ファイバ内をソリトンが伝播することによって発生する。周波数シフトソリトンが発生するのは、パルス内の誘導ラマン散乱 (stimulated Raman scattering, SRS) によってエネルギーがソリトンの高周波成分から低周波成分へと輸送されるためである。

図3に示すのは、PCFへの印加送出電力を1.1 W程度まで漸増させたときに12.6 m PCFの出力において観測される光スペクトルの変化である。PCFの出力では、1550～約1630 nmの波長域で

波長可変性を持つソリトンが得られた。1610 nmの中心波長を持つソリトンについて観測された光スペクトルを図4(a)に示す。対応する自己相関トレース(図4(b))によって示されるパルス幅は176 fsであった。

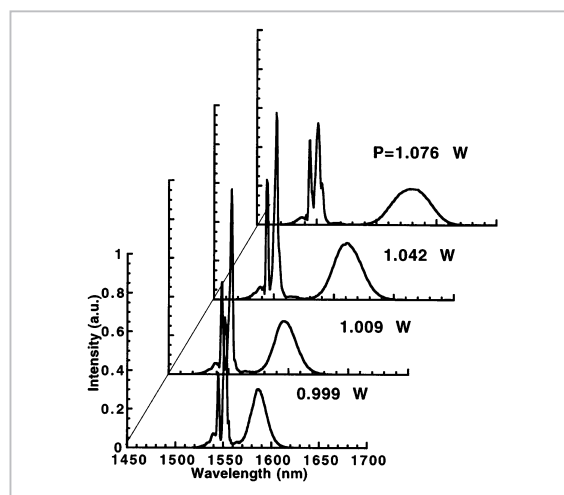


図3 送出電力を増加させたときにPCFの出力で観測されたラマン・ソリトンの典型的な光スペクトル
PCFの長さは12.6 m

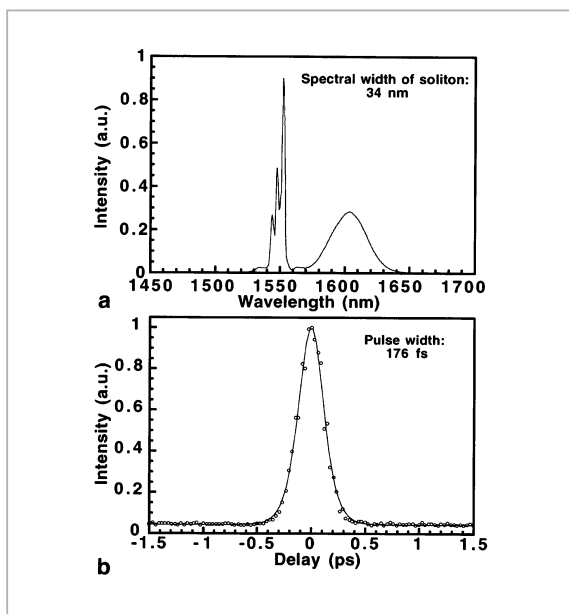


図4 PCFの出口で得られる出力パルス特性
(a)ピーク波長が1610 nmのソリトンを示す光スペクトル、(b)ラマン・ソリトンの自己相関トレース

4 光ファイバ非線形性を用いたパルス・リタイミング

データとともに符号化されて長距離伝送システム中を伝送されると、これらの光パルスは増幅やチャネル間衝突を繰り返し受けることによってタイミング・ジッタが蓄積し、ビット誤りの発生や通信システムの大幅な性能低下に至る。タイミング・ジッタをなくすための光ファイバによる対処法としては、同期振幅変調や位相・周波数変調後に分散性光ファイバに通すなど、これまでにも幾つかの方法が実証されている[8]。

本稿では光ファイバ非線形性を用いた光パルス・リタイミングの全光的方法を紹介する。リタイミングの原理を示したのが図5である。そこで

は同じ繰り返し周波数を持つ二つのパルス列(制御と信号)が異常分散PMファイバに送り込まれている。この光ファイバは偏波方向がslow軸及びfast軸に沿っている[9]。弱いパルス(信号)と強いパルス(制御)の瞬間的な相対位置関係に応じ、XPMによって信号内に誘発される周波数チャープは正負のいずれにもなり得る。信号パルスが制御パルスと時間的に一致しているとき、平均光周波数は変化しない。しかし信号パルスのほうが先に到達すると、その周波数は長波長側へシフトし、異常分散のある光ファイバ中を伝播する時間がそれだけ長くなる。逆に後から到達したパルスのほうは周波数が短波長側へシフトするためファイバの透過時間が短くなる。言い換えると、制御パルスが弱い信号を効果的にドラッグしてリタイミングを行う。この方法で必要とされる波長の異なる二つの直交偏波パルスについて群速度が一致する様子を図6に示す。

図7に示す実験では、500 m長の低複屈折PM光ファイバを用いた。(1550 nmにおいて)約17.3 ps/nm/kmの波長分散と 2.97×10^{-4} の複屈折を持つ光ファイバを用いたところ、55 nm離れた波長において直交偏波パルス間の群速度が一致した。繰り返し数が10 GHzのパルスレーザを1545 nmの波長で動作させてパルス光源とした。レーザ出力の一部を濾波及び増幅し、5.1 psのパルス幅と220 mWの平均パワーを持つ制御パルス列を生成した。実験に使用した信号パルスは1596 nmの波長と5.3 psのパルス幅を持ち、スーパーコンテニウム光(supercontinuum, SC)発生とそれに続くスペクトルフィルタリングによって生成した。ファイバに入射する信号パルスと制御パルスとの間の時間遅延は、制御パルスの経路内に置いた可変遅延線を用いて調節した。遅延量を変えながら

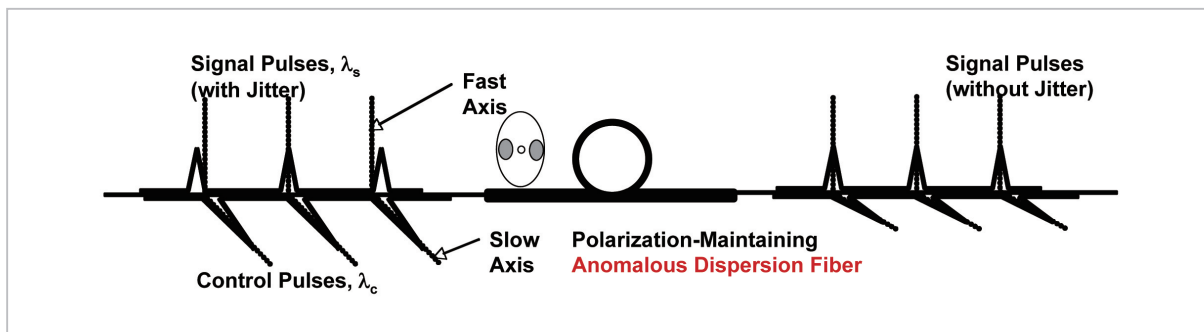


図5 XPMによるパルス・リタイミングを示す概略図(信号光と制御光が直交偏波の場合)

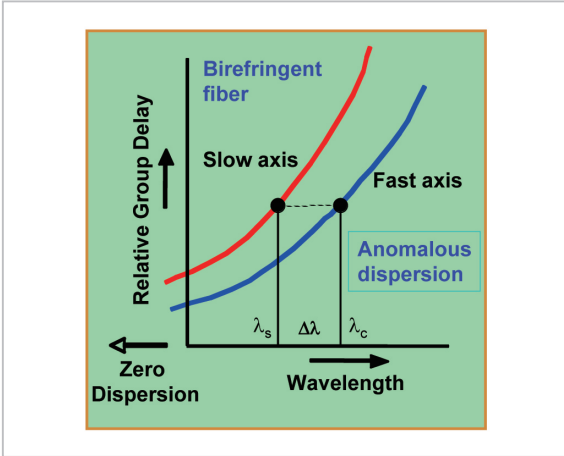


図6 直交偏波パルス間の群速度の一致

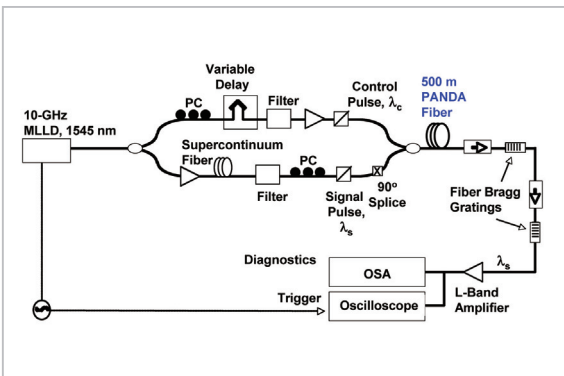


図7 信号パルスのリタイミングに使用した実験構成

フィルタの出力で信号をモニタした。

図8は、次の三つのケースについて観測された出力信号の光スペクトルと波形を示したものである。(a)と(d)制御パルスが信号パルスと重なった。(b)と(e)制御パルスがファイバの入り口において2.7 ps 進んでいた。(c)と(f)制御パルスがファイバの入り口において2.7 ps 遅れていた。制御パルスがファイバの入り口において信号パルスより進んでいると、XPMによって信号スペクトルが青方偏移する様子がはっきりと見られた。それに対応して波長は時間軸の負方向に約2 ps 偏移した。同様に、制御パルスが信号パルスより遅れていると信号スペクトルの赤方偏移が観測され、時間軸においてそれに対応した波形の遅延(約2 ps)が見られた。このことは、強い制御パルスが弱い信号パルスをXPMによって引き寄せたことをはっきり

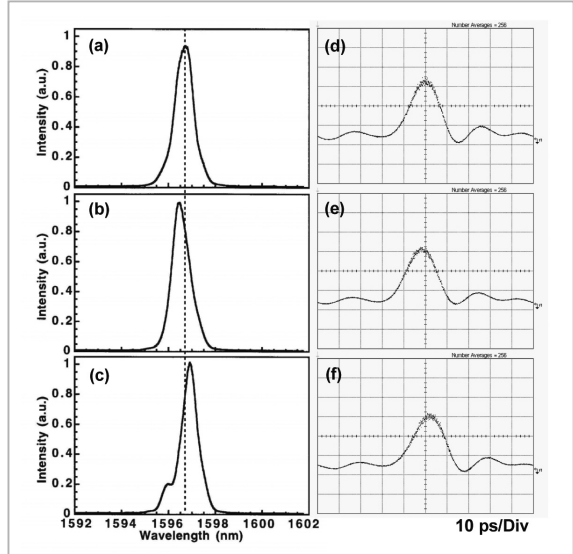


図8 PM光ファイバの出口で検出される信号パルスの光スペクトル(左)と波形(右)

(a)と(d)では制御パルスは光ファイバの入り口において信号パルスと一致する。(b)と(e)では制御パルスが2.7 ps 進んでいる。(c)と(f)では制御パルスが2.7 ps 遅れている。

りと示していた。この結果が示唆するのは、パルス列の個々の信号パルスのタイミング・ジッタがランダムであるならば、制御パルスは信号パルスをリタイミングし、タイミング・ジッタを効果的に低減するということである。

5 まとめ

本稿では、波長可変のピコ秒・フェムト秒パルスを光通信に適した高繰り返し数で発生する小型パルス光源に対し、高非線形で異常分散性を持つPCFが応用できることを実証した。PCFの導入はデバイス長を大幅に低減することに役立っている。筆者は、PCFを採用したファイバレーザを用いて1.3 psのパルスが40 GHzの繰り返し数で生成されることを実証した。また、異常分散性の偏波保存ファイバ中を同時伝搬する直交偏波制御パルスにより、ウォークオフのないXPMによってパルスのリタイミングが実現されることを報告した。10 GHzのパルス繰り返し数において±約2 psのパルス・リタイミングが見事に実現された。

参考文献

- 1 D.Ellis, R.J.Manning, I.D.Phillips, and D.Nesset, "1.6 ps pulse generation at 40 GHz in phase locked ring laser incorporating highly nonlinear fiber for application to 160 Gbit/s OTDM networks", Electron. Lett., Vol.35, pp.645-646, 1999.
- 2 E.Yoshida, N.Shimizu, and M.Nakazawa, "A 40-GHz 0.9-ps regeneratively mode-locked fiber laser with a tuning range of 1530-1560 nm", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.11, pp.1587-1589, 1999.
- 3 K.S.Abedin, M.Hyodo, and N.Onodera, "Active stabilization of a higher-order mode-locked fiber laser operating at a pulse repetition-rate of 154 GHz", Opt. Lett., Vol.26, pp.151-153, 2001.
- 4 J.K.Ranka, R.S.Windeler, and A.J.Stentz, "Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm", Opt. Lett., Vol.25, pp.25-27, 2000.
- 5 E.M.Dianov, A.Ya.Karasik, P.V.Mamyshev, A.M.Prokhorov, V.N.Serkin, M.F.Stel'makh, and A.A.Fomichev, "Stimulated Raman conversion of multisoliton pulses in quartz optical fibers", JETP Lett., Vol.41, pp.294-297, 1985.
- 6 N.Nishizawa and T.Goto, "Compact system of wavelength-tunable femtosecond soliton pulse generation using optical fibers", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 11, pp. 325-327, Jan. 1999.
- 7 K.S.Abedin, "Widely-tunable femtosecond soliton pulse generation at 10-GHz repetition-rate by utilizing the soliton self-frequency shift in photonic crystal fiber", Opt. Lett., Vol.28, pp.1760-1762, 2003.
- 8 L.A.Jiang, M.E.Grein, H.A.Haus, and E.P.Ippen, "Timing jitter eater for optical pulse trains", Opt. Lett., Vol.15, pp.78-80, 2003.
- 9 Kazi S.Abedin, "Ultrafast Pulse Retiming using Cross-Phase Modulation in an anomalous-dispersion polarization-maintaining fiber", Opt. Lett., Vol.30, pp.2979-2981, 2005.

**アベディン カジ サルワル**

新世代ネットワーク研究センター超高速フォトニックネットワークグループ主任研究員(旧情報通信部門超高速フォトニックネットワークグループ主任研究員) 博士(工学)
非線形光学