

# Comb-like profiled fiber を用いる高繰り返しパルス光源

高坂 繁弘<sup>\*1,\*2,\*3</sup>・小関 泰之<sup>\*1</sup>・井上 崇<sup>\*2</sup>・並木 周<sup>\*2,†</sup>

## High-Repetition-Rate Optical Pulse Sources Using Comb-Like Profiled Fiber

Shigehiro TAKASAKA<sup>\*1,\*2,\*3</sup>, Yasuyuki OZEKI<sup>\*1</sup>, Takashi INOUE<sup>\*2</sup> and Shu NAMIKI<sup>\*2,†</sup>

We present our recent progress on high-repetition-rate short pulse sources based on “comb-like profiled fiber (CPF).” CPF is a pulse compression fiber using highly nonlinear fiber, and has unique features such as short fiber length, wide wavelength tunability, design flexibility, and applicability to high-repetition rate pulse generation. In this article, we summarize the features of CPF, and show some examples of CPF-based pulse sources: (i) CL-band wavelength tunable optical pulse generation at a repetition rate of 40 GHz, (ii) nearly exact conversion of a 160-GHz optical beat signal to a soliton train, and (iii) 1-THz repetition-rate optical pulse train generation. In addition, as a seed pulse source at repetition rates higher than 100 GHz, we introduce an externally-synchronized 160-GHz optical beat source based on an optical phase-locked loop.

**Key words:** high-repetition-rate optical pulse source, comb-like profiled fiber, highly nonlinear fiber, optical phase-locked loop

超高速光信号処理技術の研究が盛んに進められている。例えば、光時分割多重 (OTDM) 方式に基づく 100 Gbit/s 超の高速信号発生や多重分離<sup>1)</sup>, 劣化した光信号を電気信号に変換することなく再生する全光再生中継器<sup>2)</sup>, あるいはアナログ光信号を光のままデジタル光信号に変換する全光 A/D 変換器<sup>3)</sup> などが提案されている。これらの技術における重要な要素技術として、時間幅が数ピコ秒以下の高繰り返し光クロックパルス列の発生が挙げられる。

安定性にすぐれた高繰り返しパルス光源を実現する一手法として、図 1 (a) に示すような、光パルス圧縮ファイバーと種パルス光源を組み合わせた構成がある。筆者らは、独自の光パルス圧縮ファイバーとして comb-like profiled fiber (CPF) の研究と開発を行ってきた<sup>4-11)</sup>。CPF は、図 2 に示すように、高非線形ファイバー (highly nonlinear fiber; HNLF) とシングルモードファイバー (single-mode fiber; SMF) を交互に接続したファイバーである。詳細については後述するが、従来のパルス圧縮ファイバーと比較

すると、ファイバーの短尺性、広帯域波長可変性、超高繰り返しパルス発生への適用性等、CPF はさまざまな特徴を有する。

一方、筆者らは、超高繰り返し領域における種パルス光源についても検討を進めている。繰り返し周波数が 40 GHz 程度以下であれば、光強度変調器によって種パルス光を発生できる (図 1 (b))。一方、40 GHz よりも高い繰り返し周波数においては、電気回路の速度制限により光強度変調器の動作は難しい。そこで、電気回路の速度制限を受けない構成として、図 1 (c) に示すビート光源を開発している。ビート光は、2 台の半導体レーザーの出力光を合波することによって得られ、その繰り返し周波数はレーザーの光周波数差に一致する。したがって、レーザーの発振波長を適切に制御することにより、繰り返し周波数が 100 GHz を超える種パルス光源を容易に実現することができる。なお、この構成において外部同期を実現するためには、後述する光位同期回路が必要である。

<sup>\*1</sup> 科学技術振興機構さきがけ (〒332-0012 川口市本町 4-1-8)

<sup>\*2</sup> 古河電気工業株式会社ファイナルフォトリクス研究所 (〒290-8555 市原市八幡海岸通 6 番地) <sup>\*3</sup> E-mail: shigehiro@ch.furukawa.co.jp

<sup>†</sup> 現所属: 産業技術総合研究所光技術研究部門 (〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第 2)

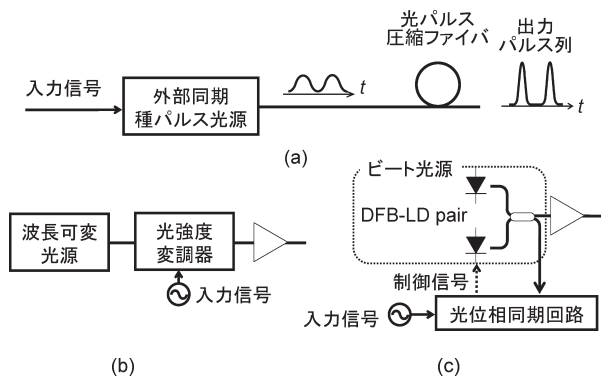


図1 光パルス圧縮ファイバーを用いた高繰り返しパルス光源の構成 (a) と種パルス光源の構成 (b), (c).



図2 CPFの構成。HNLF：高非線形ファイバー，SMF：シングルモードファイバー。

本稿では、CPFを用いた高繰り返しパルス光源についての最近のトピックスを紹介する。以下に本稿の構成を示す。最初にCPFの動作原理と特徴について述べ、続いてCPFを用いたパルス圧縮の実例として、CLバンド(1530~1610 nm)波長可変40 GHz繰り返しパルス列発生、160 GHz繰り返し高品質ソリトンパルス列発生、そして1 THz繰り返し光パルス列発生についての実験結果を示す。さらに、光位相同期回路を用いた外部同期ビート光発生の実験結果を示す。

## 1. CPFの動作原理と特徴

CPFにおける基本的な光パルス圧縮動作は、comb-like dispersion profiled fiber, CDPF<sup>12)</sup>におけるそれと同様である。CDPFはChernikovらによって提案された圧縮ファイバーであり、分散シフトファイバー(dispersion shifted fiber, DSF)とSMFを交互に接続したものである。表1に示すように、DSFの分散値が小さく、SMFの分散値が大きいのに対して、両ファイバーの非線形性は同程度である。光パルスがCDPF中を伝搬すると、光パルスはSMFとDSFの長さに応じた「平均の」分散効果および非線形効果を受けることになる。したがって、各ファイバーの長さを適切に設計し、平均的な分散効果を長手方向に制御することで、分散減少ファイバー<sup>14)</sup>と同様のファイバー特性を模擬できる。それゆえ、断熱ソリトン圧縮効果によってパルスが圧縮される。

CPFでは、DSFのかわりにHNLFを使用する。ここでも、CPFを伝搬するパルスはSMFとHNLFの「平均

表1 HNLF, SMF, DSFの特性(典型値)。

Parameters (@1550 nm)	HNLF	SMF	DSF
分散 ( $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ )	-1~1	16.5	0.0
分散スロープ ( $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{km}^{-1}$ )	0.013 <sup>13)</sup>	0.06	0.07
非線形定数 ( $\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ )	25.1 <sup>13)</sup>	1.3	2.7
伝送損失 ( $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ )	1.16 <sup>13)</sup>	0.20	0.21
ゼロ分散波長 (nm)	1500~1600	1310	1550
SMFとの融着接続損失 (dB, Typical)	<0.1 <sup>13)</sup>	0.02	0.04

の」効果を受けながら圧縮される。ここで、表1に示すように、HNLFの非線形性がDSFと比較して約1桁大きく、分散スロープが約1桁小さい点に注目されたい。これらHNLFの特徴に起因して、CPFはCDPFのみならず、分散減少ファイバーやstep-like dispersion-profiled fiber (SDPF)<sup>15)</sup>など、断熱ソリトン圧縮を行う従来のパルス圧縮ファイバーよりもすぐれた特性を有する。以下に、CPFの特徴を列挙する。

第1に、HNLFの高非線形性により、ファイバーの短尺化、もしくは低パワー動作が可能である。したがって、CPFはコンパクトなモジュール化が容易であり、光源全体の消費電力も小さい。

第2に、CPFは設計が容易でかつ製造性が高い。前述のように、CDPFおよびCPFはファイバー長の調整のみで圧縮特性を調整でき、設計の柔軟性が高い。したがって、分散減少ファイバーのように特殊なファイバー製造技術を必要としない。また、CPFをCDPFと比較すると、HNLFの短尺性のために、HNLF中の分散効果は無視でき、一方、HNLFの非線形性と比較してSMF中の非線形性は無視できる。したがって、HNLFとSMFのファイバー長に応じて、パルスに及ぼす非線形性と分散性の効果をほぼ独立に調整できる<sup>5)</sup>。筆者らは、この特徴を活用し、さまざまなCPFの設計法を提案している<sup>7-10)</sup>。

第3に、CPFは広帯域な波長可変動作に有利である。分散減少ファイバーやSDPFなど従来の圧縮ファイバーでは、光パルスの圧縮に伴って長手方向に分散値を低減する必要があった。このため、ファイバーの出力端に近くなると分散スロープ等の高次分散効果が発現しやすく、これが圧縮特性の波長依存性を生じる一要因であった。一方、CPFではHNLFを使用することでファイバーの短尺化が可能であり、しかもスロープ値そのものが小さいことから、HNLFにおける分散スロープの影響はきわめて小さく抑えられている。実際、筆者らはすでに、Cバンド(1530~1560 nm)波長可変CPFパルス圧縮動作を実現している<sup>6)</sup>。

第4に、CPFでは誘導ブリルアン散乱(stimulated Brill-

lounin scattering; SBS) の抑圧が容易である。SBS が発生すると、出力パルスの特性が劣化する。SBS は繰り返し周波数の高い光パルスを圧縮する際に顕著に発生する。しかしながら、SBS は伝送路中にアイソレーターを挿入することで抑圧できることが知られており<sup>16)</sup>、CPF にもこの方法を適用することが可能である<sup>5)</sup>。

以上のように、CPF はすぐれた特徴を有し、高繰り返し光パルス列発生において非常に有効な手段である、といえる。

## 2. CPF を用いた光パルス圧縮の実例

CPF の特徴を活用することで、従来の光パルス圧縮ファイバーでは実現できなかったさまざまな光パルス圧縮特性が実現する。ここでは、その特徴を示す例として、40 GHz 繰り返し広帯域波長可変パルス圧縮、160 GHz 繰り返し高品質ソリトンパルス列発生、そして 1 THz 繰り返しパルス発生の実験結果を示す。

### 2.1 40 GHz 繰り返し CL バンド広帯域波長可変パルス圧縮

CL バンドをカバーする、1530 nm から 1610 nm の波長帯において、繰り返し周波数が 40 GHz、パルス幅が 2 ps 以下の  $\text{sech}^2$  パルス列を発生することを目的として、CPF を設計して波長可変パルス圧縮実験を行った結果を示す<sup>7)</sup>。

#### 2.1.1 CPF の設計

CPF への入力パルスは、ニオブ酸リチウム強度変調器 (LNM) より出力される、繰り返し周波数が 40 GHz、パルス幅が 8.5 ps の Return-to-Zero パルス列とする。この幅を 1.8 ps に圧縮するために、HNLF と SMF の組が 6 段で構成された CPF を設計した。6 段 CPF のファイバー非線形定数と分散値の長手方向の値を図 3 に示す。CPF の構成は前 2 段と後 4 段で設計指針が異なっている。前 2 段は入力パルスの波形を効率的に  $\text{sech}^2$  型へと変換するソリトンコンバーターとして設計し、チャープフリーで幅が 3.9 ps の  $\text{sech}^2$  型パルスを出力する。一方、後 4 段は stationary rescaled pulse (SRP) の伝搬に基づいた設計を行った<sup>8,9)</sup>。1 段あたりの圧縮率を 1.21 と設定すると、SRP の波形はほぼ  $\text{sech}^2$  型として得られ、4 段の CPF を用いることで、ソリトンコンバーターの出力パルスの時間幅 3.9 ps が  $3.9/1.21^4 \sim 1.8$  ps に圧縮される。なお、SRP 伝搬に基づいて設計された CPF に、波形が  $\text{sech}^2$  型ではない LNM 出力パルスを直接入力すると、ペDESTAL (非圧縮成分) が増大する可能性がある。そのため、CPF の前 2 段をソリトンコンバーターとして設計することは、CPF 全体として

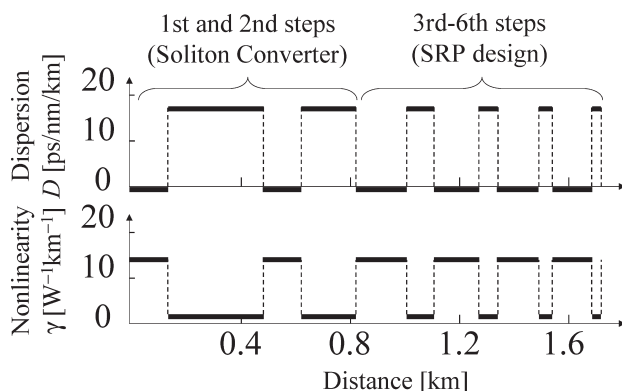


図3 CPF の分散値と非線形定数。

高品質なパルス圧縮を行ううえで有効である。

#### 2.1.2 実験と結果

設計に基づいて作製した 1.8 km の CPF を用いて、パルス圧縮実験を行った。図 4 に実験構成を示す。LNM を用いて波長可変光源 (TLS) の出力光を強度変調し、40 GHz 繰り返しパルス列を発生する。光増幅器 (EDFA) で増幅後に、光フィルター (BPF) により自然放光雑音を除去する。可変光減衰器 (VOA) で入力パルス列の平均パワーを調整した後、CPF を伝搬させ、出力波形を測定する。

中心波長が 1570 nm のときの出力波形を図 5 に示す。 $\text{sech}^2$  波形にほぼ一致する結果が得られた。また、波長を 1530 nm から 20 nm おきに 1610 nm まで変化させたときのパルス幅、時間帯域幅積、そしてピーク・ペDESTAL 比の値を図 6 に示す。ただし、各波長における入力平均パワーはそれぞれ 18.0, 18.5, 18.75, 19.5, 20.5 dBm である。図 6 より、各波長においておよそ 1.8 ps のパルス幅と、およそ 0.33 の時間帯域幅積が得られたことがわかる。

以上より、LNM より出力される 40 GHz 繰り返し光パルス列に対して CPF を用いた圧縮を行うことで、CL バンドにわたる波長範囲で 2 ps 以下の時間幅をもつ光パルスが発生できることを確認した。この光源の応用としては、OTDM による 160 GHz 繰り返し信号の発生などが考えられる。

### 2.2 160 GHz 繰り返し高品質ソリトンパルス列発生

前述のように、CPF は 2 種のファイバー長の調整のみで任意のファイバー特性を模擬できる。この特徴を活用し、緻密な設計を行うことによって、光パルスを高精度に制御できることが期待される。ここでは、160 GHz ビート光を圧縮し、高いピーク・ペDESTAL 比を有するフェムト秒ソリトンパルスを発生した例を紹介する<sup>10)</sup>。

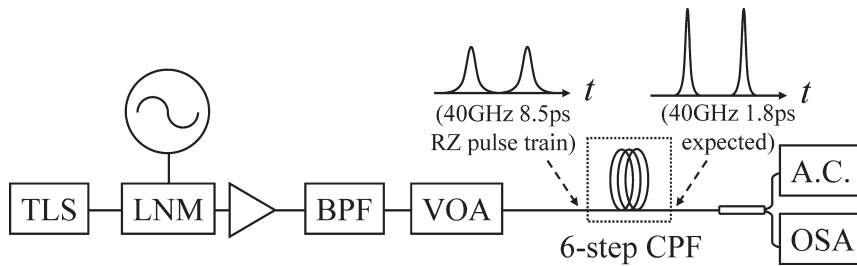


図4 実験構成. CPF: Comb-like profiled fiber, TLS: 波長可変光源, LNM: LN 変調器, BPF: 帯域通過フィルター, VOA: 可変光減衰器, A.C.: 自己相関計, OSA: 光スペクトラムアナライザー, RZ: Return-to-Zero.

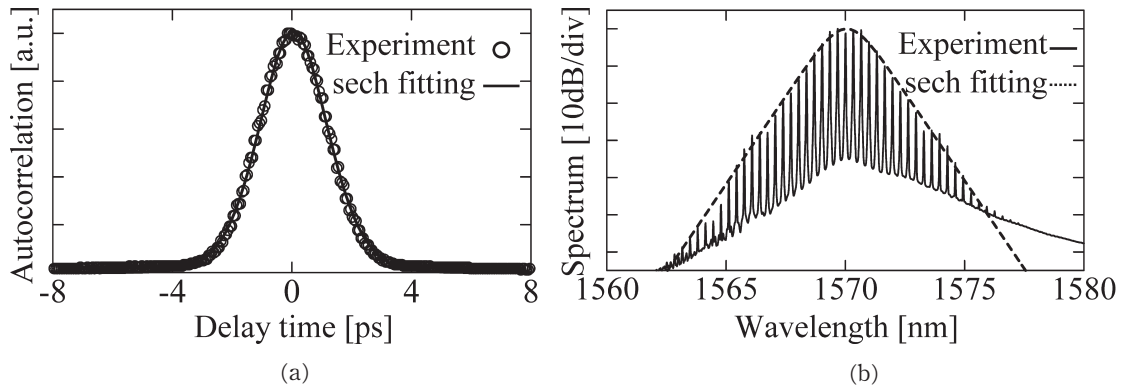


図5 中心波長 1570 nm のときの CPF 出力パルスの自己相関波形 (a) とスペクトル (b).

### 2.2.1 CPF の設計

まず、ビート光をソリトンパルスへ高精度に変換するファイバーの設計を行った。一般に、光ファイバー中の光パルスの伝搬は、非線形シュレーディンガー方程式  $i(\partial U / \partial \xi) = \{d(\xi)/2\} \partial^2 U / \partial \tau^2 - |U|^2 U$  でよく表される。ただし、 $U$ ,  $\xi$ ,  $d$ ,  $\tau$  は規格化された光電界、距離、分散値、時間である。詳細については割愛するが、 $d(\xi)$  を  $\xi$  の多項式で表し、繰り返し計算によって  $d(\xi)$  を最適化した<sup>10)</sup>。最適化の結果を図7に示す。図7(a)が最適化された分散プロファイルである。この分散プロファイルを有す

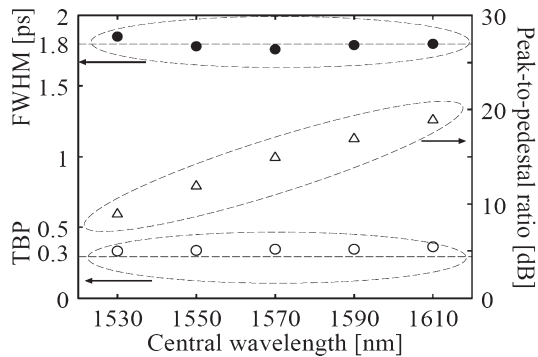


図6 パルス幅、時間帯域幅積 (TBP)、ピーク・ペダスタル比の波長依存性。

るファイバーを使用して得られるパルスの強度波形を図7(b)に示す。パルスのピーク強度に比較して、不要成分が 60 dB 程度抑圧されることがわかる。また、図7(c)に示すスペクトルはソリトン波形によくフィットし、スペクトルの歪みが発生しない。

### 2.2.2 実験と結果

上記設計に基づいて CPF を作製し、ビート光を高精度にソリトンパルスに変換する実験を行った。図8に実験構成を示す。2台の DFB-LD が出力する連続光を合波・光増幅して得られたビート光を CPF に入力した。ビート光の繰り返し周波数および平均パワーは 160 GHz および 500 mW である。CPF は 40 組の HNLF と SMF から構成され、総長は 700 m 程度である。各ファイバーの長さは、CPF が図7(a)の分散プロファイルを模擬するように決定した。

CPF 出力パルスの測定結果を図9に示す。自己相関波形は、半値全幅 324 fs の  $\text{sech}^2$  パルスを仮定するフィッティング曲線に合致する。ピーク・ペダスタル比は 21 dB であり、設計値よりも低い値が得られているが、この値は自己相関計のダイナミックレンジにより制限されているものと考えている。一方、スペクトルは帯域幅 1 THz の  $\text{sech}^2$  曲線によくフィットし、スペクトルの歪みが発生し

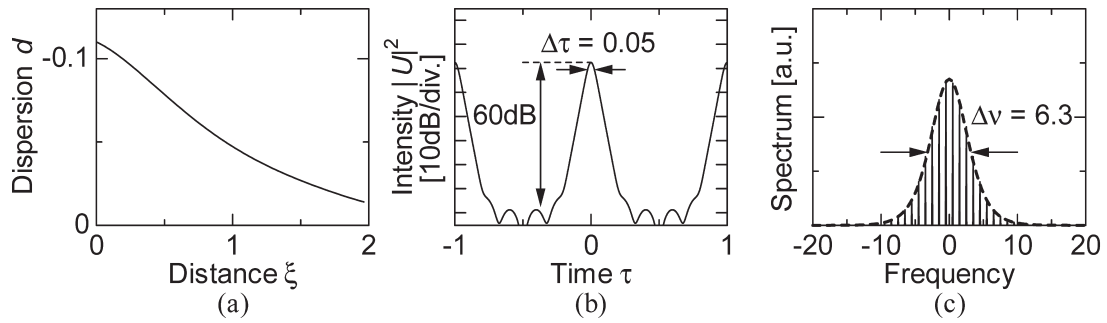


図7 (a) ビート・ソリトン変換分散プロファイルの最適化結果. (b) 変換後の強度波形. (c) 変換後のスペクトル.  $\xi$ ,  $\tau$ ,  $d$ ,  $U$  はそれぞれ規格化された距離, 時間, 分散, 光電界.

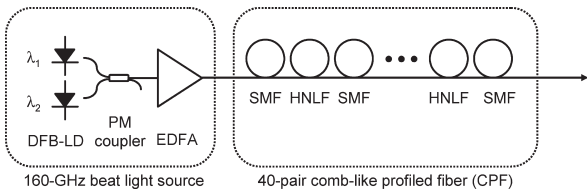


図8 実験構成. PM: 偏波保持.

ないことがわかる. なお, 時間帯域幅積は0.32である.

以上の結果から, CPF の設計自由度を活用し, 緻密な設計を行うことによって, 高純度かつピーク・ペダスタル比の高いソリトン列の発生が可能となることが確認された.

### 2.3 1 THz 繰り返し光パルス列発生

HNLF の高非線形性を活用すると, パルス圧縮に必要なパルスエネルギーを低減できる. このため, CPF は高繰り返しパルスの圧縮時においても平均光パワーを低く抑えることができるため, 高繰り返しパルスの発生に有利である. このデモンストレーションとして, 1 THz 繰り返し光パルス列の発生実験を行ったので紹介する<sup>11)</sup>.

実験構成は図8と同様であるが, 以下の変更を行っている. ビート光の周波数および平均パワーをそれぞれ1

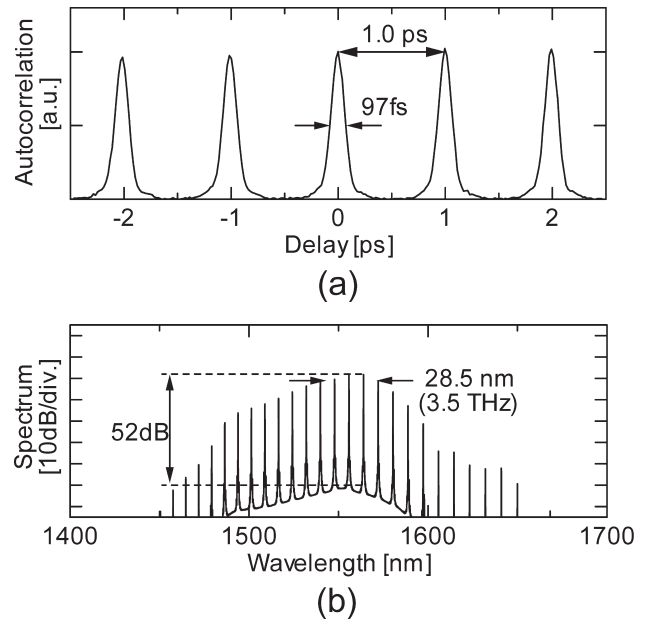


図10 CPF 出力パルスの自己相関波形 (a) とスペクトル (b).

THz および 1.25 W に設定した. また, CPF は 15 組の HNLF と SMF から構成され, 総長は 115 m である. 図 10 に光パルス列の測定結果を示す. 自己相関波形からは

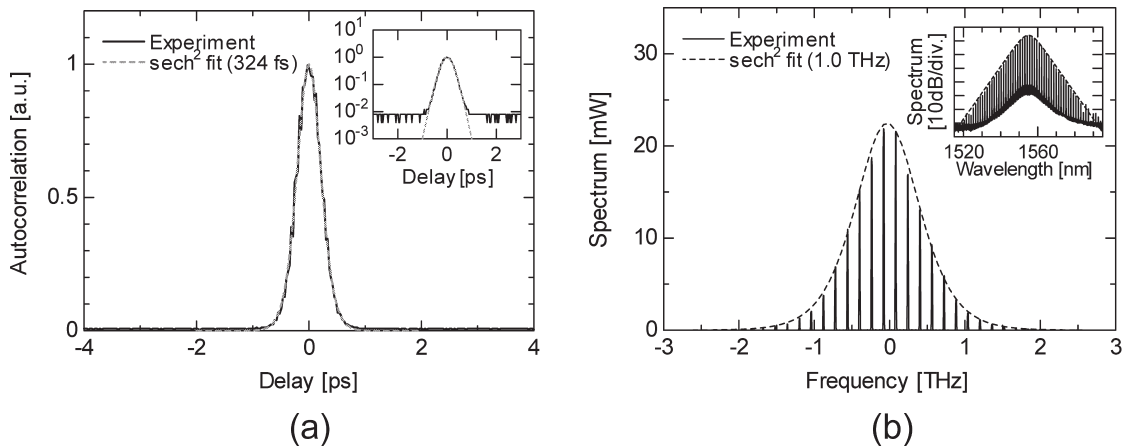


図9 CPF 出力ソリトンパルスの自己相関波形 (a) とスペクトル (b).

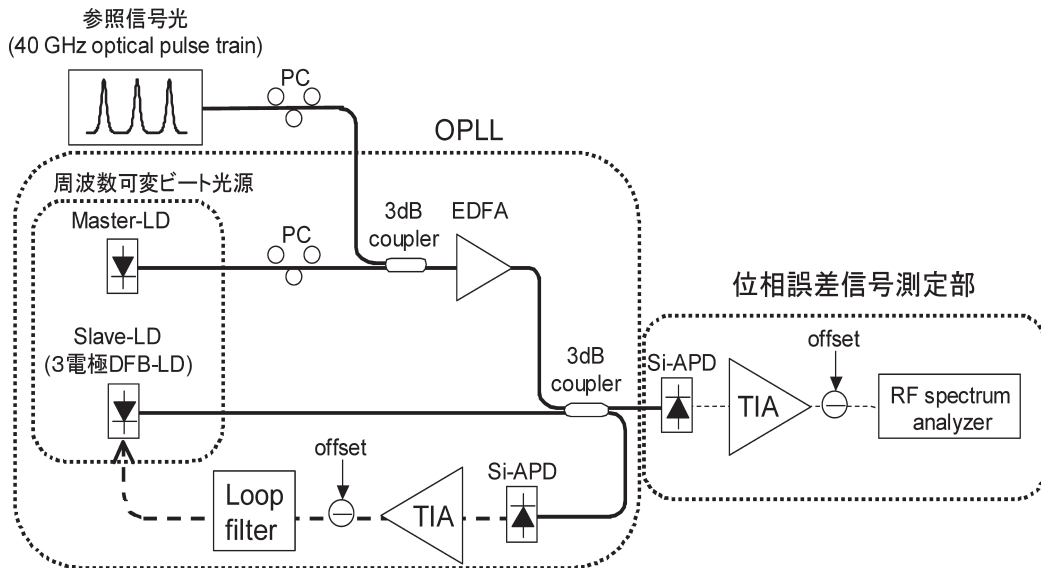


図 11 OPLL 実験構成. TIA: 電流増幅器, PC: 偏波制御器, EDFA: エルビウム添加光ファイバー増幅器.

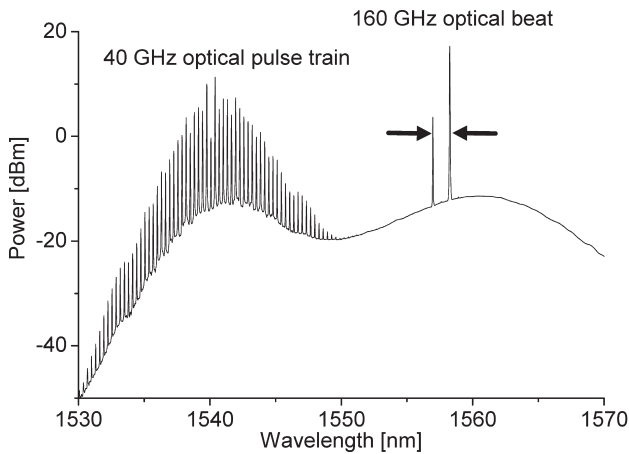


図 12 Si-APD 入力光のスペクトル.

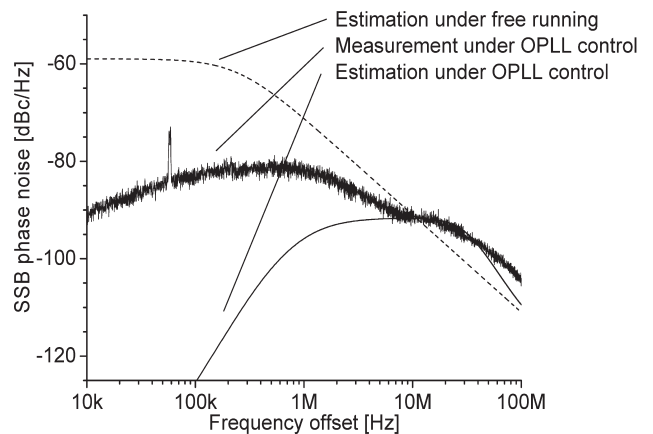


図 13 160 GHz ビート光の SSB 位相雑音スペクトル. 太線: OPLL 動作時の測定値, 点線: 無制御時の計算値, 実線: 実験条件から計算される予測値.

繰り返し周波数 1 THz, 時間幅 97 fs の光パルス列がみとれる. また, ピーク・ペダスタル比は 10 dB 以上, 光 S/N 比は 52 dB, 時間帯域幅積は 0.34 であり, 高品質なパルスが得られている. なお, HNLF の高次分散の影響によってスペクトルが若干非対称化しているが, 自己相関波形の著しい劣化はみられていない.

これらの結果から, CPF がテラヘルツ繰り返し周波数においても, サブ 100 フェムト秒までの圧縮能力を有することが確認された.

### 3. 外部信号に同期した 160 GHz ビート光の発生

ビート光源は 100 GHz を超える高繰り返しパルス列を発生できる利点をもつが, 外部同期を実現するためには, ビート光の位相を制御する回路が必要となる. ここでは, そのような回路として筆者らが開発してきた光位相同期回

路 (optical phase-locked loop: OPLL) を紹介する<sup>17)</sup>.

#### 3.1 OPLL の構成

OPLL の構成を図 11 に示す. マスター LD とスレーブ LD によりビート光源を構成する. ビート光と参照パルス光のタイミングを比較するため, 両者を合波して Si-APD に入力し, 二光子吸収 (TPA) 電流をタイミング誤差信号として検出する. この誤差信号がループフィルターを介してスレーブ LD にフィードバックされることで, ビート光のタイミングが参照信号に同期する. OPLL のループ遅延時間およびループ帯域はそれぞれ 6 ns および 20 MHz である. なお, スレーブ LD として 3 電極 DFB レーザーを使用することで, 広帯域な FM 応答性 (100 MHz 以上) と狭線幅性 (250 kHz) を実現している. また, TPA 効率を高めるため Si-APD 上のスポットサイズを 4.3  $\mu\text{m}$

に絞った。

### 3.2 実験と結果

OPLLによる160 GHzビート光の外部同期実験を行った。参照光として40 GHz繰り返し1 ps光パルス列を用いた。Si-APDへの入力光のスペクトルを図12に示す。ビート光と参照パルス光が入力されていることがわかる。各信号の光パワーは、マスターLD 50 mW、スレーブLD 3 mW、参照パルス光220 mWである。OPLL動作時の160 GHzビート光のSSB位相雑音スペクトルを図13に示す。OPLL動作により位相雑音が抑制されることを確認した。これは、160 GHzビート光の外部同期に成功したことを示している。なお、タイミングジッターは実効値で291 fsであった。この値は実験条件から計算される予測値にほぼ一致しており、理論通りの動作が実現されている。系の改善により、実効値で90 fs以下のタイミングジッターを実現できることが期待される。

本OPLLの出力周波数は、ビート光源を構成する2台のDFB-LDの出力光の周波数差で設定できる。また、入出力部分に光学デバイスを用いているため、動作特性は繰り返し周波数によらない。これらの特徴から、本OPLLはテラヘルツに及ぶような高い繰り返し周波数においても動作することが期待される。

高繰り返しパルス光源を実現するための光パルス圧縮ファイバーとして、CPFの特徴を紹介した。また、CPFを用いたパルス圧縮を行い、1530~1610 nmの波長範囲で2 ps以下の40 GHz繰り返しパルス列発生、160 GHz繰り返し高品質ソリトン列発生、そして1 THz繰り返し光パルス列発生の実験結果を示した。最後に、OPLLを用いることで外部信号に同期した160 GHzビート光を発生する実験結果を示した。

これらの結果から、CPFを用いた高繰り返しパルス光源は、超高速光信号処理技術を実現する要素技術として、有力な一手段になりうると考えられる。

### 文 献

- 1) M. Nakazawa, T. Yamamoto and K. R. Tamura: "1.28 Tbit/s-70 km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator," *Electron. Lett.*, **36** (2000) 2027-2029.
- 2) S. Watanabe, R. Ludwig, F. Futami, C. Schubert, S. Ferber, C. Boerner, C. Schmidt-Langhorst, J. Berger and H.-G. Weber: "Ultrafast all-optical 3R-regeneration," *IEICE Trans. Electron.*, **87** (2004) 1114-1118.
- 3) K. Ikeda, J. M. Abdul, S. Namiki and K. Kitayama: "Optical quantizing and coding for ultrafast A/D conversion

- using nonlinear fiber-optic switches based on Sagnac interferometer," *Opt. Express*, **13** (2005) 4296-4302.
- 4) M. Tadakuma, O. Aso and S. Namiki: "A 104 GHz 328 fs soliton pulse train generation through a comb-like dispersion profiled fiber using short high nonlinearity dispersion shifted fibers," *2000 Optical Fiber Communications Conference (OFC 2000)*, ThL3 (2000) pp. 178-180.
  - 5) K. Igarashi, J. Hiroishi, T. Yagi and S. Namiki: "Comb-like profiled fibre for efficient generation of high quality 160 GHz sub-picosecond soliton train," *Electron. Lett.*, **41** (2005) 688-690.
  - 6) K. Igarashi, H. Tobioka, M. Takahashi, T. Yagi and S. Namiki: "Widely wavelength-tunable 40 GHz femtosecond pulse source based on compression of externally-modulated pulse using 1.4 km comb-like profiled fibre," *Electron. Lett.*, **41** (2005) 797-798.
  - 7) T. Inoue and S. Namiki: "CL-band tunable optical pulse compression based on stationary rescaled pulse propagation in comb-like profiled fibre," *31st European Conference on Optical Communications (ECOC 2005)*, Mo3.5.2 (2005) pp. 55-56.
  - 8) T. Inoue, H. Tobioka, K. Igarashi and S. Namiki: "Design of comb-like profiled fiber for efficient pulse compression based on stationary rescaled-pulse propagation," *2005 Optical Fiber Communications Conference (OFC 2005)*, JWA7 (2005).
  - 9) T. Inoue, H. Tobioka and S. Namiki: "Stationary rescaled pulse in alternately concatenated fibers with  $O(1)$ -accumulated nonlinear perturbations," *Phys. Rev. E*, **72** (2005) 025601(R).
  - 10) Y. Ozeki, S. Takasaka, T. Inoue, K. Igarashi, J. Hiroishi, R. Sugizaki, M. Sakano and S. Namiki: "Nearly exact optical beat-to-soliton train conversion based on comb-like profiled fiber emulating a polynomial dispersion decreasing profile," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **17** (2005) 1698-1700.
  - 11) Y. Ozeki, S. Takasaka, J. Hiroishi, R. Sugizaki, T. Yagi, M. Sakano and S. Namiki: "Generation of 1 THz repetition rate, 97 fs optical pulse train based on comb-like profiled fibre," *Electron. Lett.*, **41** (2005) 1048-1050.
  - 12) S. V. Chernikov, J. R. Taylor and R. Kashyap: "Comblike dispersion-profiled fiber for soliton pulse train generation," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 539-541.
  - 13) J. Hiroishi, N. Kumano, K. Mukasa, R. Sugizaki, R. Miyabe, S. Matsushita, H. Tobioka, S. Namiki and T. Yagi: "Dispersion slope controlled HNL-DSF with high gamma of  $25 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$  and band conversion experiment using this fiber," *28th European Conference on Optical Communications (ECOC 2002)*, PD1.5 (2002).
  - 14) S. V. Chernikov, E. M. Dianov, D. J. Richardson and D. N. Payne: "Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 476-478.
  - 15) S. V. Chernikov, J. R. Taylor and R. Kashyap: "Experimental demonstration of step-like dispersion profiling in optical fibre for soliton pulse generation and compression," *Electron. Lett.*, **30** (1994) 433-434.
  - 16) Y. Takushima and T. Okoshi: "Suppression of simulated Brillouin scattering using optical isolators," *Electron. Lett.*, **28** (1992) 1155-1156.
  - 17) S. Takasaka, Y. Ozeki, K. Igarashi and S. Namiki: "Optical phase-locking of 160 GHz optical beat to 40 GHz optical pulse train using a three-electrode DFB-LD and a Si avalanche photodiode," *31st European Conference on Optical Communications (ECOC 2005)*, Th1.3.6 (2005) pp. 799-800.

(2005年8月17日受理)