

Comb-Like Profiled Fiber圧縮器と超短パルス光源への展開

Pulse Compressor Using Comb-Like Profiled Fiber and its Development for Ultra Short Pulse Sources

小栗淳司*

Atsushi Oguri

五十嵐 浩司*

Koji Igarashi

飛岡秀明*

Hideaki Tobioka

阿久津 剛史*

Takeshi Akutsu

篠崎淳一*

Jun-ichi Shinozaki

高橋正典*

Masanori Takahashi

廣石治郎*

Jiro Hiroishi

八木 健*

Takeshi Yagi

河原亮*

Ryo Kawahara

岡村和郎*

Kazuro Okamura

加木信行*

Nobuyuki Kagi

松下俊一*

Shun-ichi Matsushita

並木周*

Shu Namiki

坂野操*

Misao Sakano

概要 光ファイバを用いたピコ秒、フェムト秒領域の超短パルス光源は通信分野のみならず、光計測技術、材料加工、バイオ用、物理学などの分野で注目を集めている。超短パルスを発生させるための光パルス圧縮器として、我々は高非線形ファイバとシングルモードファイバのペアを多段接続して構成されたComb-like profiled fiberを提案している。今回は、入力パルスの波長や繰り返し周波数を変えてComb-like profiled fiber圧縮器から一様な出力パルス特性を得られるか検討した。その結果、1530～1560 nmの波長範囲、5～500 MHzの繰り返し周波数範囲において一様な出力パルス特性を確認した。

1. はじめに

光ファイバを用いた超短パルス光源は、小型性と低コスト性、安定性の観点から、超高速光通信や光計測技術、材料加工、バイオ用光エレクトロニクス、物理学などの様々な分野において注目を集めている。

超短パルスを発生するための光ファイバ圧縮器として、我々は高非線形ファイバ(HNLF)とシングルモードファイバ(SMF)のペアを多段接続して構成されたCPF(comb-like profiled fiber)圧縮器を報告してきた^{1)～3)}。CPF圧縮器は分散プロファイルを柔軟に設計できるため、製造性の観点から優れた長所をもつ。今回は、CPF圧縮器の更なる利便性を確認するために、入力パルスの波長や繰り返し周波数を変えても一様な出力パルス特性が得られるか検討した。そして、1530～1560 nmの波長範囲⁴⁾、5～500 MHzの繰り返し周波数範囲において⁵⁾一様な出力パルス特性を確認したので報告する。

1.1. 波長可変な超短パルス光源の重要性

光ファイバ伝送システムの伝送容量を上げるために、波長軸上で信号を多重する波長分割多重(WDM)方式と、時間軸上で信号を多重する時間分割多重(TDM)方式の研究が進められてきた。TDM方式には電子回路の高速化限界などの課題があったため、WDM方式が精力的に実用化されてきた。しかしながら、

WDM方式と比べて送受信器数が少ないと一括制御が容易であることから、光領域でTDMを行う光時間分割多重(OTDM)方式が注目を集めている。そのような超高速光通信においては、光-電気変換の必要のない全光信号処理の開発が重要になってくる。全光信号処理の実現のためのキーデバイスが超短パルス光源であり、クロックパルス列として安定動作することが求められている。そして、OTDMのWDM化に対応するためにも、様々な波長におけるクロックパルス列、すなわち超短パルス光源が必要になる。

1.2. 繰り返し周波数可変な超短パルス光源への期待

光計測技術や材料加工、バイオ用光エレクトロニクス、物理学などの分野では、小型で低コスト、安定性の観点から光ファイバを用いた超短パルス光源の開発が注目を集めている。更に、繰り返し周波数や波長、パルス幅、パルスエネルギーなどを可変にできれば、光源の利便性の向上を期待できる。しかしながら、光ファイバ型超短パルス光源として一般的に用いられてきたモードロック型ファイバレーザは共振器長が固定されるため、繰り返し周波数を大きく変えることができなかった。これに対して、光パルス圧縮器を用いる光源は、種パルスの繰り返し周波数を変えることで、繰り返し周波数可変に対応できることを期待できる。繰り返し周波数を制御できれば、各パルス特性を維持したまま平均パワーを制御することができるため、光源の利便性の向上が図れる。

* 研究開発本部 ファイテルフォトニクス研究所

2. 光パルス圧縮技術について

2.1. 断熱ソリトン圧縮技術

断熱ソリトン圧縮は基本ソリトンに光ファイバ中で緩やかな摂動を与えることで光パルスを圧縮する方法であり、時間波形やスペクトル形状の劣化が少ない優れた圧縮方法である。断熱ソリトン圧縮技術には大きく分けて、DDF (dispersion-decreasing fiber) を用いる方法⁶⁾、分散の異なる複数の光ファイバを用いてファイバ長手方向の分散プロファイルを変化させるSDPF (step-like dispersion profiled fiber) を用いる方法⁷⁾、分散の異なる2種類の光ファイバを用いてファイバ長手方向の分散プロファイルを変化させるCDPF (comb-like dispersion profiled fiber) を用いる方法⁸⁾、ファイバ長手方向に緩やかに利得を与えるラマン増幅を用いる方法⁹⁾の4種類がある。

図1にDDF、SDPF及びCDPFの分散プロファイルの模式図を、表1にこれら4種類の断熱ソリトン圧縮方法の比較を示す。

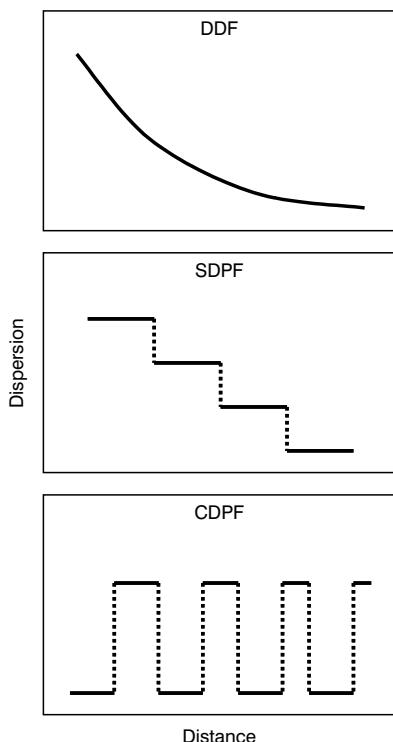


図1 DDF, SDPF, CDPFの分散プロファイルの模式図
Schematic profile of dispersion of DDF, SDPF and CDPF.

表1 断熱ソリトン圧縮方法の比較

Comparisons of adiabatic soliton compression methods.

方式	長所	短所
DDF	•理想的な断熱圧縮が可能	•ファイバの製造が困難
SDPF	•比較的製造が容易	•多種類のファイバが必要 •接続箇所が多い
CDPF	•2種類のファイバで設計可能 •誘導ブリリュアン散乱の抑圧効果あり	•接続箇所が多い
ラマン圧縮	•利得により圧縮率の制御可能	•利得の長手分布制御が困難

表1に示すように、DDF方式は摂動となる分散を緩やかに減少させることができるので、理想的な断熱ソリトン圧縮を行うことができる。しかしながら、分散パラメータが理想的に光ファイバ長手で減少するような光ファイバの作製は困難である。そこで、異なる分散を持つ複数の光ファイバを組み合わせて、近似的にDDFプロファイルを実現するSDPFとCDPFが提案された。SDPFは多種類の光ファイバが必要なのに対し、CDPFは2種類の光ファイバで製造可能である。したがって、実用性の観点からはCDPFが優れている。また、CDPFは分散値の大きく異なる光ファイバを多段接続しているため、誘導ブリリュアン散乱抑圧の観点でも有利である。

2.2. Comb-like profiled fiberによる光パルス圧縮

理想的なCDPFは非線形媒質と分散媒質が多段接続される構成を持つ。一般的には、非線形媒質としてゼロ分散シフトファイバ (dispersion shifted-fiber: DSF) を、分散媒質としてSMFを用いて、それらを融着接続することにより作製される。

我々はHNLFとSMFのペアを多段接続するCPFを新たに提案している。DSFの代わりにHNLFを用いるため、図2に示すように分散だけでなく非線形定数もくし状のプロファイルを持つ。非線形媒質として分散値が小さく非線形性が大きい光ファイバを用いるため、理想的な非線形媒質を得ることができるとともに、圧縮器の短尺化を図ることができる。加えて、SDPFと同じように分散値の大きく異なる光ファイバを多段接続しているため、誘導ブリリュアン散乱の抑圧にも優れている。ただし、完全に誘導ブリリュアン散乱を抑制できるわけではないので、必要に応じてアイソレータを挿入する必要がある。

2.3. 高非線形ファイバの開発

我々は非線形定数が大きくて分散値が小さいCPFに適したHNLFも開発している¹⁰⁾。表2に、従来のパルス圧縮器に用いられてきたSMFとDSFと、開発したHNLFの典型的な特性を比較した。HNLFの非線形定数はSMFの10倍以上、DSFの約10倍である。

3. CPF圧縮器を用いた光パルスのフェムト秒圧縮

CPFを用いたフェムト秒圧縮の波長可変性と繰り返し周波数可変性について評価したので、それぞれ報告する。具体的に

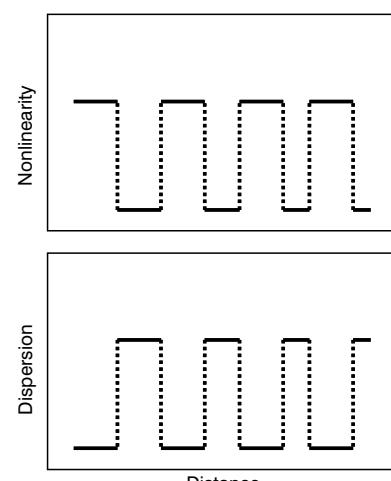


図2 CPFの非線形定数と分散プロファイルの模式図
Schematic profile of nonlinearity and dispersion of CPF.

表2 SMF, DSF, HNLFの特性
Characteristics of SMF, DSF and HNLF.

Parameters (@ 1550 nm)	SMF	DSF	HNLF
Attenuation coefficient (dB/km)	0.20	0.21	1.16
Zero-dispersion wavelength (nm)	1310	1550	1500-1600
Dispersion slope (ps·nm ⁻² ·km ⁻¹)	0.09	0.07	0.013
Effective area (μm ²)	80	50	9.7
Nonlinearity (W ⁻¹ km ⁻¹)	1.3	2.7	25.1

は、CPFへの入力パルスの波長を変えて最適動作させた時の、スペクトルと自己相関波形からパルス特性の一様性を評価した。同様に、CPFへの入力パルスの繰り返し周波数を変えて最適動作させた時のパルス特性の一様性を評価した。

3.1. CPF圧縮器を用いた波長可変フェムト秒圧縮

図3に40 GHzパルス列をCPF圧縮する実験構成図を示す。波長可変光源(TLS)からの波長 λ_{in} のCW光をLN変調器(LNM)により外部変調することで、40 GHzのパルス列を発生させた。それをEDFAで増幅し、CPF圧縮するのに最適な入力パワー P_{in} に調整した。CPFは12ペアのHNLFとSMFからなり、トータルで1.4 kmである。CPFの分散と非線形定数のプロファイルを図4に示す。高非線形ファイバの分散の絶対値は1 ps·nm⁻¹·km⁻¹以下であり、分散スロープは0.02 ps·nm⁻²·km⁻¹である。また、誘導ブリリュアン散乱を抑圧するため、

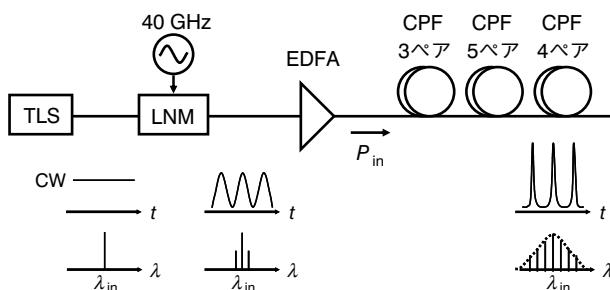


図3 波長可変超短パルス光源の模式図
Schematic diagram of wavelength-tunable optical short pulse source.

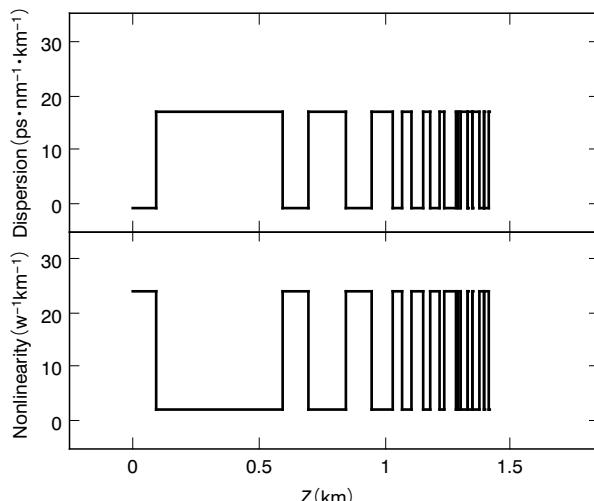


図4 12ペア CPF の分散と非線形定数のプロファイル
Profile of dispersion and nonlinearity of 12 pairs of CPF.

CPFの途中にアイソレータが2個挿入されている。

図5にCPFへの入力パルスとCPFからの3, 8, 12ペアの各点における出力パルスの自己相関波形とスペクトルを示す。ここで、 λ_{in} は1550 nmであり、 P_{in} は23.6 dBmであった。図5の自己相関波形と光スペクトルのいずれにおいても、実験値(実線)とsech²のフィッティング(破線)がよく一致していることが分かる。また、光パルスがCPFを伝搬するに従って圧縮され、12ペア出力ではパルス幅500 fsまで圧縮されることが分かる。12ペア出力における時間バンド幅積 $\Delta t \Delta v$ は $\Delta t \Delta v$ が0.33であり、peak-to-pedestal比 R_{pp} は15 dBであった。

図6に、TLSの波長 λ_{in} を1530 ~ 1560 nmの範囲で変え、EDFAによりCPF12ペア出力のパルス幅が500 fsになるように P_{in} を微調整した時のパルス幅 Δt 、時間バンド幅積 $\Delta t \Delta v$ 、入力パワー P_{in} と R_{pp} の λ_{in} 依存性を示す。図6より、 P_{in} を最適化することにより、 Δt が550 fs以下に、 $\Delta t \Delta v$ が0.36以下に維持されていることが分かる。また、 R_{pp} が14 dB以上であることを確認した。

次にCPFの波長可変性について検討する。波長可変性は分散媒質の2次分散 β_2 の波長依存性に相当する3次分散 β_3 に大き

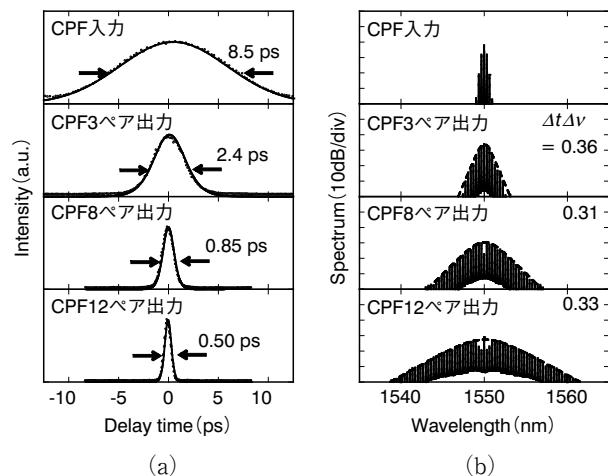


図5 CPFの入力と各出力点における (a) 自己相関波形と (b) 光スペクトル
Autocorrelation traces (a) and optical spectra (b) of CPF input and output.

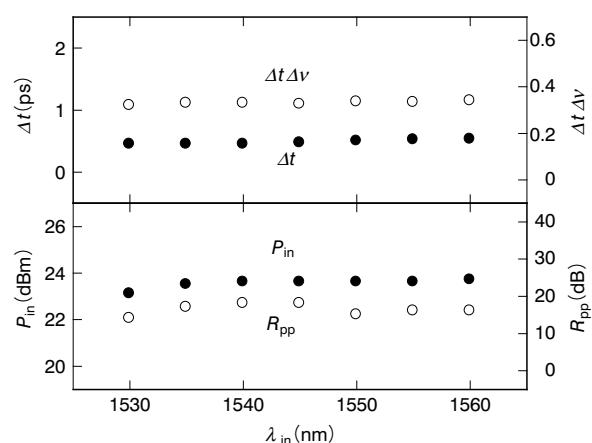


図6 パルス幅 Δt と時間バンド幅積 $\Delta t \Delta v$ 、CPF入力パワー P_{in} 、Peak-to-pedestal比 R_{pp} の波長 λ_{in} 依存性
Dependence of pulse width Δt , time-bandwidth product $\Delta t \Delta v$, input power P_{in} to CPF and peak-to-pedestal ratio R_{pp} on wavelength λ_{in} .

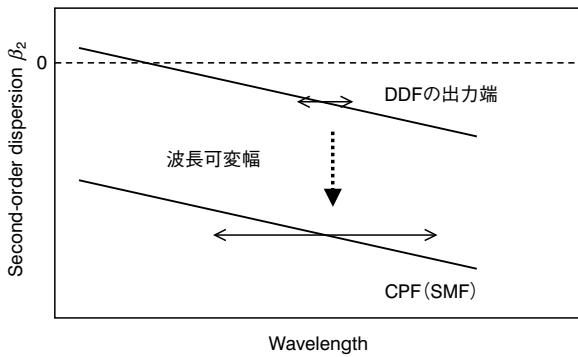


図7 CPFとDDFの2次分散の模式図
Schematic diagram of second order dispersion of CPF and DDF.

く影響を受ける。したがって、 β_2 と β_3 の比 $|\beta_2/\beta_3|$ が大きいほど波長可変に有利であると言える。図7にCPFとDDFの2次分散の模式図を示す。DDFと比べてCPFは2次分散 β_2 が大きいため、3次分散 β_3 の影響を受けにくく、波長可変を実現しやすいと言える。

3.2. CPF圧縮器を用いた繰り返し周波数可変フェムト秒圧縮

図8に繰り返し周波数可変超短パルス光源の模式図を示す。PPG(pulse pattern generator)からの400 ps電気パルスでDFB-LD(distributed feedback laser diode)を利得スイッチし、DCF(dispersion compensating fiber)によりチャーブ補償することで種パルスを発生させた。その種パルスを1段目のEDFAでCPF圧縮に最適なパルスエネルギーまで增幅した後、CPFに入力した。そして、正常分散EDFA(ND-EDFA)で50 pJパルスエネルギーまで増幅した。CPFは13ペアのHNLFとSMFからなり、総ファイバ長は2.5 kmである。ND-EDFAには $-4 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ の分散を持つ20 mのEDFからなるEDFAを2段用いた。そして、ND-EDFAの後には2 mのSMFが接続されている。種パルスの繰り返し周波数は、DFB-LDを利得スイッチするための電気パルスの繰り返し周波数により制御することができる。

図9に種パルスの自己相関波形と光スペクトルを、図10にCPF出力における自己相関波形と光スペクトルを、図11にND-EDFA出力における自己相関波形と光スペクトルを示す。図9～図11はそれぞれ図8のA, B, Cの各ポイントにおける出力パルスに対応している。

図9の種パルス出力における自己相関波形の結果から、CPFへの入力パルスは12～17 ps程度で多少のばらつきがあることが分かる。これは電気アンプの帯域や調整方法などが原因と考えられる。

図10における破線プロットは、実験結果に sech^2 をフィッ

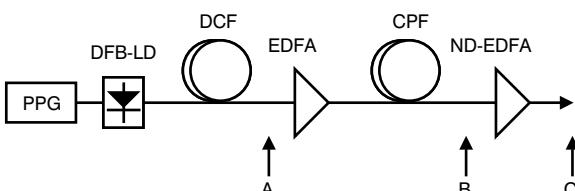


図8 繰り返し周波数可変超短パルス光源の構成図
Schematic diagram of repetition-rate tunable optical short pulse source.

ティングしたものを示す。自己相関波形と光スペクトルの実験結果とフィッティングがよい一致をしていることが分かる。自己相関波形からCPF出力におけるパルス幅と R_{pp} を見積もったところ、それぞれ $\Delta t < 500 \text{ fs}$, $R_{\text{pp}} > 10 \text{ dB}$ であった。以上のことから、CPFは広い繰り返し周波数可変に対応できることが分かる。また、図9で示すようにCPFへの入力パルスのパルス幅が数ps変わっても、CPFへの入力パルスエネルギーを微調整することでパルス幅が一定な出力パルスを得られることが分かる。

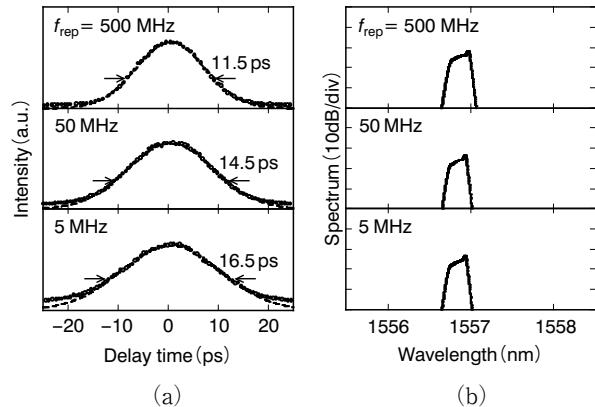


図9 種パルスの(a)自己相関波形と(b)光スペクトル
Autocorrelation traces (a) and optical spectra (b) of seed pulse.

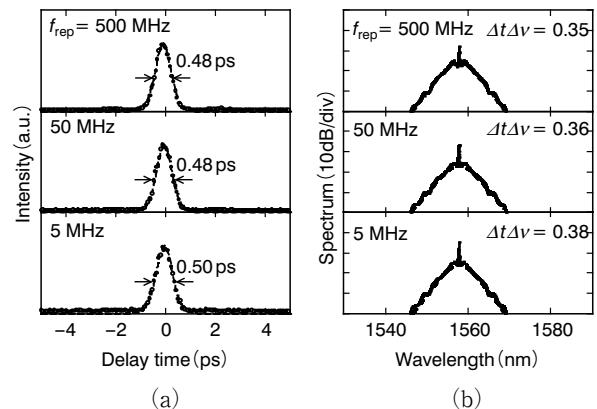


図10 CPF出力の(a)自己相関波形と(b)光スペクトル
Autocorrelation traces (a) and optical spectra (b) of output from CPF.

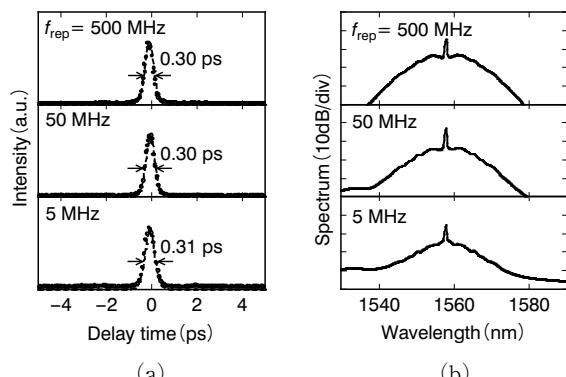


図11 ND-EDFA出力の(a)自己相関波形と(b)光スペクトル
Autocorrelation traces (a) and optical spectra (b) of output from ND-EDFA.

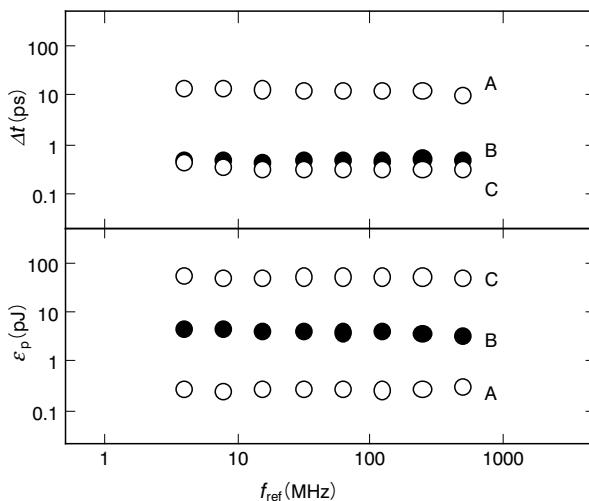


図12 (A)種パルスと(B)CPF出力,(C)ND-EDFA出力におけるパルス幅とパルスエネルギーの繰り返し周波数依存性
Repetition rate dependence of pulse width Δt and pulse energy ε_p of seed pulse (A), output from CPF (B) and output from ND-EDFA (C).

図11のND-EDFA出力における自己相関波形の結果から、繰り返し周波数に関わらずND-EDFA出力のパルス幅が約300 fsで一定であることが分かる。また、ND-EDFA中の非線形効果とSMFによる分散補償により、CPF出力の500 fsパルスが300 fsまで更に圧縮されていることが分かる。

図12は図9～図11の結果をまとめたもので、パルス幅とパルスエネルギーの繰り返し周波数依存性を示す。図12のAは種パルス出力を、BはCPF出力を、C点はND-EDFA出力におけるパルス幅とパルスエネルギーを示し、図8のA, B, Cの各ポイントに対応している。5～500 MHzの繰り返し周波数範囲において300 fs, 50 pJの一様なパルス列が得られていることが分かる。

4. おわりに

HNLFとSMFのペアを多段接続することにより、非線形定数と分散値が光ファイバ長手方向にくし状に分布するCPF圧縮器を紹介した。そして、CPF圧縮器が1530～1560 nmの波長範囲において一様に約500 fs圧縮できることを確認した。また、5～500 MHzの範囲において一様な出力パルスを得られることを確認した。CPF圧縮器は製造性に優れ、波長可変に

も繰り返し周波数可変にも柔軟に対応できることから、光通信や光計測、バイオ用光エレクトロニクス、材料加工、物理学などの様々な分野で応用できると期待する。

参考文献

- (1) K. Igarashi, R. Miyabe, J. Hiroishi, S. Takasaka, H. Tobioka, S. Matsushita, T. Yagi, and S. Namiki: "Ultra-highly pure 160 GHz subpicosecond soliton train generation with average dispersion-managed comb-like dispersion profiled fiber using highly-nonlinear fiber," CLEO2003, (2003), CMH7.
- (2) K. Igarashi, H. Tobioka, S. Takasaka, S. Matsushita, and S. Namiki: "Duration-tunable 100-GHz sub-picosecond soliton train generation through adiabatic Raman amplification in conjunction with soliton reshaping," OFC2003, (2003), ThB6.
- (3) K. Igarashi, S. Takasaka, R. Miyabe, J. Hiroishi, R. Sugizaki, T. Yagi, and S. Namiki: "Wideband-tunable highly pure 40 GHz picosecond soliton train generation by short comb-like profiled fiber," CLEO2004, (2004), CFC2.
- (4) K. Igarashi, H. Tobioka, M. Takahashi, J. Hiroishi, T. Yagi, M. Sakano, and S. Namiki: "Widely tunable sub-picosecond compression of 40 GHz externally-modulated pulse train using 1.4 km long comb-like profiled fiber," OFC2005, (2005), JWA6.
- (5) K. Igarashi, H. Tobioka, A. Oguri, T. Akutsu, S. Namiki, M. Sakano, R. Kawahara, K. Okamura, Y. Aoyagi, and N. Kagi: "5-500 MHz repetition-programmable low pedestal femtosecond pulse source using comb-like profiled fiber," CLEO2005, (2005), CTUCC4.
- (6) K.R. Tamura and M. Nakazawa: "54-fs, 10-GHz soliton generation from a polarization-maintaining dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber pulse compressor," Opt. Lett., **26** (2001), 762.
- (7) 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.
- (8) S.V. Chernikov, J.R. Taylor, and R. Kashyap: "Comblike dispersion-profiled fiber for soliton pulse train generation", Opt. Lett., **19** (1994), 539.
- (9) P.C. Reeves-Hall and J.R. Taylor: "Wavelength and duration tunable subpicosecond source using adiabatic Raman compression," Electron. Lett., **37** (2001), 417.
- (10) 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 of 25 W-1km-1 and band conversion experiment using this fiber," ECOC2004, (2004), PD1.5.