High-power Raman fiber lasers for broadband Raman amplifiers and CW supercontinuum generation

○谷口 篤、齊藤 智春、プラブ・マヘンドラ、植田 憲一（電通大 レーザ研）

○Atsushi Taniguchi, Tomoharu Saitou, Prabhu Mahendra, Ken-ichi Ueda
(Institute for Laser Science, University of Electro-communications)

WDM は $1.3\mu\text{m}$ から $1.5\mu\text{m}$ において超広帯域な伝送を実現する手段として注目されている。しかし長距離伝送するためには広帯域な光増幅器が必要で、Ge-ドープファイバースペクトル増幅器などが使われている。このラマンファイバースペクトル増幅器の励起源として今回講演する P-ドープファイバースペクトル増幅器を提案する。またこの P-ドープファイバースペクトル増幅器にシングルモード ファイバーを融着することにより、CW の超広帯域ラマンファイバースペクトル増幅器を発振した。

P-ドープファイバーは 1330 cm^{-1} のラマンシフトを持ち、波長 1064 nm を用いて励起するとラマン散乱によって 1239 nm に 1 次ストークス光、 1484 nm に 2 次ストークス光が現れる。そこで中心波長 1239 nm の 2 つの FBG (Fiber-Bragg Gratings) を用いて共振器を構成し、最大出力 8.4 W の CW の Yb-ドープファイバースペクトル増幅器 (波長 1064 nm) を用いて励起することにより、スロープ効率 76.9% で最大出力 4.11 W が得られ、パワー変換効率が 47.4% に達した。また中心波長 1483.4 nm の FBG を用いた共振器に替えると 2 次ストークス光におけるラマンファイバースペクトル増幅器が発振し、スロープ効率 32.8% 、最大出力 2.24 W 、パワー変換効率 27% が得られた。次に中心波長 1239 nm と 1484 nm の 2 つの共振器を同時に組み込むことにより、2 波長同時発振ラマンファイバースペクトル増幅器を発振させた。これは世界で初の試みであり、波長 1239 nm と 1484 nm の出力はそれぞれ 1.05 W と 0.95 W であった。

また、この 2 波長同時発振ラマンファイバースペクトル増幅器に長さ 350 m のシングルモード ファイバーを融着し出力端に中心波長 1483.4 nm の FBG をつけることにより、2 次ストークス光 (1484 nm) で約 100 nm の帯域を持つ CW の超広帯域ラマンファイバースペクトル増幅器を発振させた。出力 2.1 W 、単位波長あたりのスペクトル強度 20 mW/nm であり、これは WDM の光源としても利用できる。このファイバーのシングルモード ファイバー部を液体窒素により 70 K にまで冷却すると、2 次ストークスに当たる 1483.4 nm よりも低波長域でスペクトルの温度依存性が観測された。この超広帯域なスペクトルは四光波混合と自己位相変調とが混ざり合った影響によるものだと考えられる。

Fig.1 Raman Fiber Laser (supercontinuum)

A Study on Remote-Pumped EDFAs for Optical Video Distribution Systems

渡辺 一哉 高野 勝美 ○中川 清司 山形大学 工学部

Kazuya WATANABE, Katsumi TAKANO, Kiyoshi NAKAGAWA

Faculty of Engineering, Yamagata University

1.はじめに：広帯域、低損失、無誘導などのメリットを持つ光伝送技術 CATV に代表される映像分配系に適用するためには、システムの許容損失を大きくできることが大切である[1]。そのため、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) を用いれば、光伝送技術のメリットを損なうことなく伝送距離及び分配数の拡大が期待できる[2]。さらに、伝送路ファイバ内に EDF を挿入し、エネルギー源である励起光を送信端局から信号伝送路を介して供給する遠隔励起 EDFA を分岐損失補償用増幅器として用いれば、端局設備以外での電気的駆動部品を除くことができ、また増幅器用給電設備も不要となることから、コストのメリットがあると考えられる。本報告では、光映像分配システムの分岐損失補償用光増幅器として、励起光源を EDF と同位置に配置する通常の EDFA (以下 n-EDFA) と、先に述べた遠隔励起 EDFA (r-EDFA) を用いた場合について、光増幅器の挿入位置と許容分岐数に関する特性の比較を行った。

2.システム構成：図 1 に検討を行ったシステム構成を示す。送信端局は、出力 12.0 dBm 、NF 5.61 dB のポストアンプを含む。光源の RIN は -160 dB/Hz とした。受信器は、光電変換効率 0.88 A/W 、熱雑音電流 $10\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ とした。送信端局から分岐点までの幹線線路、分岐点から受信器までの分配線路それぞれの距離を 10 km 、 2 km とし、線路損失は、信号波長 ($1.553\mu\text{m}$) 励起波長 ($1.48\mu\text{m}$) に関して 1.0 dB/km とした。n-EDFA、r-EDFA に用いる EDF 長はともに 14.5 m とした。この EDF 長では、励起パワー 60 mW 前方励起すると、分岐点直前に n-EDFA を配置したとき、出力 12.0 dBm 、NF 6.10 dB となる。r-EDFA は、その励起光源、WDM カプラを送信端局に配置する。映像信号は、チャンネル数 50、各チャンネル当たりの変調度 5%、映像帯域 4.2 MHz とし、AM 変調とし、評価 CNR 品質は 51.0 dB と仮定し、シミュレーションを行った。

3.シミュレーション結果：図 2 に、増幅器の配置位置 L_1 と所要 CNR を確保できる最大分岐数 n の解析結果を示す。なお、r-EDFA については、励起光源出力 P_{pr} をパラメータに計算を行った。r-EDFA では、 L_1 が短いほど許容分岐数が大きい。これは、図 3 に示す L_1 と光増幅器出力の関係から、受光パワーの劣化が少ないためである。誘導ブリルアン散乱 (SBS) しきい値を $+17\text{ dBm}$ [3] と仮定すると、図 3 より L_1 の下限が決まる。図 2 の■印は、その位置を示しており、 $P_{\text{pr}} > 400\text{ mW}$ では、n-EDFA を分岐直前に配置した場合と同等以上の分岐数を確保できる。

4.まとめ：n-EDFA と r-EDFA の位置と最大許容分岐数、光増幅器出力の関係を示した。r-EDFA は、SBS を考慮して最適位置に配置したとき、分岐直前に n-EDFA を配置した場合と同等以上の分岐数を確保できることがわかった。

参考文献：[1] 重松 他、電子情報通信学会論文誌, vol.J75-B-1, No.5, pp.314-322(1992)。[2] 米田 他、テレビジョン学会技術報告, ROFT89-31, pp.31-36(1989)。[3] G.Wilson, et al., OAA'99, FAI-1, pp.230-231(1999)。

図1 シミュレーションモデル

図2 増幅器位置に対する分岐数

図3 増幅器位置に対する出力パワー

Generation and Characterization of Super Continuum Using Highly Nonlinear Optical Fiber

○西澤 典彦, 吉田 睦^A, 後藤 俊夫(名古屋大学, ^Aアイシン精機)○Norihiro Nishizawa, Makoto Yoshida^A, and Toshio Goto(Nagoya University, ^AAISIN SEIKI CO., LTD.)

はじめに 近年, 超短パルス光源の実用化が進んできたが, これまでの光源は装置が大がかりで, 又, 波長の変化にも光学系の調整が必要であった。近年, 我々はファイバレーザと光ファイバを用いて, コンパクトな波長可変超短パルス光源を開発することに成功した。^{1,2)} 本光源は, 励起光の強度を変化させることによって, 超短パルス光の波長を連続に変化させることができる。パルス光の波長シフトは光ファイバ中の非線形係数や波長分散の大きさに依存する。そこで今回は, 光ファイバに大きな非線形性を得ることのできる, 且つ波長分散を制御した定偏波分散シフト高非線形ファイバ (PM-DS-HNF) を用いることによって, 1.1~2.1 μ mの広帯域に渡って広がるスーパーコンティニュームを得ることに成功した。又, 出力光の特性を実験的に評価したので報告する。

実験 実験では, 受動モード同期フェムト秒ファイバレーザ (IMRA Femtolite) を用いた。発振波長 1558 nm, 繰り返し周波数 48 MHz, パルス幅 110 fs, 最大出力約 60 mW である。光ファイバには波長 1.55 μ m においてモードフィールド径 3.7 μ m, 波長分散 +1.0ps/km/nm の PM-DS-HNF を用いた。光源からの光は 1/2 波長板と偏波分光岐器を用いてパワーを調整し, 波長板を用いて偏光方向を定偏波ファイバの複屈折軸に合わせた。右図は 200m の波長において入射光強度が低入射光強度時 (2mW) と高入射光強度時 (約 15mW) の時の光スペクトルの観測結果を表している。入射光強度を徐々に増加させて行くと, まず励起光パルスの長波長側にソリトンパルスが, 又, 短波長側にアンチストークスパルスが生成される。更に入射光強度を増加させて行くに従って, 多数のソリトンパルスとそれに対応するアンチストークスパルスが生成され, その後, 徐々に連なり, スーパーコンティニュームへと成長して行った。最大で波長 1.1~2.1 μ m の広帯域に渡って広がるスペクトルのコンティニュームの生成が観測された。

参考文献 1) N.Nishizawa and T.Goto, IEEE Photon.Technol.Lett. 11 (1999) 325.

2) N.Nishizawa et al., Jpn.J.Appl.Phys. 39(2000) L409.

図 200mにおけるPM-DS-HNFの出力における光スペクトルの観測結果

More than 1000 channel optical frequency chain generation from a single supercontinuum source with 12.5 GHz spacing

○山田英一, 高良秀彦, 大原拓也, 森邦彦, 佐藤憲史, 井上靖之^A, 柴田知尋^A, 阿部淳^A, 盛岡敏夫, 佐藤健一
(NTT未来ネットワーク研究所, ^ANTTフォニクス研究所)

E. Yamada, H. Takara, T. Ohara, K. Mori, K. Sato, Y. Inoue^A, T. Shibata^A, M. Abe^A, T. Morioka, and K.-I. Sato
(NTT Network Innovation Laboratories, ^ANTT Photonics Laboratories)

1. はじめに 将来の大容量のフォトニックネットワークを構築するためには, 1.5 μ m帯で 25THz以上に広がる光周波数帯にITUグリッドに沿って多波長キャリアを発生させることが必要になる。これを実現する手法としてスーパーコンティニューム(SC)光発生技術^[1]があり, 100nm以上の超広帯域にわたり光周波数間隔が一定の縦モード (光キャリア) を発生させることができる。SC光源をWDM等の通信用光源として適用するためにはこれらの縦モードの雑音特性が重要となるが, 伝送に十分なSNRを有する光キャリアの発生は報告されていない^[2]。本報告ではSC光源による1000チャンネル以上の高SNR光周波数チェーンの発生について述べる。

2. 光周波数チェーン発生実験 図1に光周波数チェーン発生の実験系およびSC光スペクトルを示す。中心波長1538nmの励起用モード同期LD^[3]により12.5GHzの繰り返しパルス列を発生し, Er添加ファイバ増幅器で増幅後, 偏波保持型の凸型分散/分散減少特性のSCファイバ^[4]に入射した。励起光源の光スペクトルはSCファイバ中で100nm以上の超広帯域スペクトルに変換され, 12.5 GHzの周波数間隔で1000チャンネル以上の光周波数チェーンを発生していることがわかる。波長1560nm近傍を拡大した光スペクトルより, 光キャリアが等間隔で発生していることが確認できる。

3. 雑音特性 発生したSC光からチャンネル間隔12.5GHzのAWG (アレイ導波路回折格子) フィルタ^[5]で単一の光キャリアを分波し, 雑音特性 (RINとQ値) を評価した。測定したRINを100MHz~2.5GHzで積分して逆数を取ることでSNRを求めた。Q値はLiNbO₃外部変調器により2.5Gbit/s(2³¹-1 PRBS)で変調して測定した。図2にSNRとQ値の波長依存性を示す。励起波長近傍の数nmを除く100nmの帯域で20dB以上の高いSNRが得られた。波長1512~1580nmにおいてQ値は18.3dB以上であり, この値は符号誤り率10⁻¹⁶以下に相当する。

4. まとめ 本光源は正確に光周波数軸に配置された高SNRの1000チャンネル以上の光周波数チェーンを発生できるため, 将来の多波長DWDMシステムや光周波数基準等の応用に有効な技術となると期待される。

文献^[1] T. Morioka et al., ECOC95, ThA1.2 ^[2] J. Kim et al., OFC2000, ThA2 ^[3] K. Sato et al., IEEE JSTQE, 5, p.590, 1999 ^[4] K. Mori et al., Electron. Lett., 33, p.1806, 1997 ^[5] K. Takada et al., OECC2000, 13B1-2

図1. 実験系およびSCスペクトル

図2. SNRおよびQ値の波長依存性

○片桐祥雅, 鈴木謙一, 橋本悦 (NTT先端技術総合研究所)

○Yoshitada Katagiri, Ken-ichi Suzuki, and Etsu Hashimoto (NTT Laboratories)

単一モードレーザは等方性の最小不確定性を持つコヒーレント状態に近い光を発生するが、実際には共振器の不安定性により発振-非発振間のカタストロフィックな挙動を示す(図1-(a))。その結果、レーザの光子統計は、カオス光特有のボーズ・アインシュタイン分布とスーパーポアソン分布の複合型となる(図2-(a))。半導体レーザのような微小共振器は発振状態の安定化に有効であるが、発振波長可変性等の機能付加するのに必要な外部共振器形のレーザでは微小化に限界があり、従って、同様の不安定が実用化の障害となっていた。

レーザ光の位相を乱雑にすれば上記不安定性を完全に除去することができる。通常の乱雑位相を持つ光は単なる雑音光であり、スペクトルスライスにより単一モード化した場合には高速情報伝達を阻害する分配雑音が発生する。しかし、位相が不確定で振幅が確定した光子数状態は、レーザの発振条件に位相条件が加わらず共振器の揺らぎに無頓着に安定なレーザ発振を可能とする。筆者らは、利得飽和特性をもつレーザ媒体を導入したリングレーザを用いて位相不確定性が大きい振幅スクイズド状態^注(図1-(b))を発生することを試み、光子数揺らぎが通常の直接検波による観測でコヒーレント状態と同程度である安定な光子列の発生に成功した(図2-(b))。このような安定なレーザ光は最適化された可変バンドパス光フィルタを用いて任意の中心波長に設定しても発生することができ、その結果、光通信帯域である1530~1610nmの範囲で連続波長可変レーザを実現することができた。

利得飽和による光子列に対するランジュバン力に基づく原理と、高速データリンク応用、スペクトル解析応用などの具体的事例は発表当日に紹介する。

注) スクイズINGは最小不確定性に關わらず不確定領域の低減として広義に定義した。

図1 発振が不安定なレーザ(a)と安定化レーザの複素平面における光子分布。

図2 通常のレーザ(a)と安定化レーザ(b)の光子統計。

有賀規 (通信総合研究所)

Tadashi ARUGA (Communications Research Laboratory)

1. はじめに

レーザ光を含む光ビームは回折のため拡がってしまう。その拡がり角を $\Delta\theta$ とすると $\Delta\theta = \lambda/D$ (但し、 λ :波長、 D :ビーム径)である。従って細いビーム程拡がりが大きくなる。例えば数 mm のビーム径の可視のレーザビームは 1km で数 10cm に拡がる。拡がりを小さくするためにはビーム径を大きくするしかない。ビーム径を大きくすることは細いビームの生成とは相反するものである。従って細いビームを長距離にわたって生成することは不可能である。

2. 非回折ビーム

特殊な光波面制御を行うことによって上述の困難を克服できる。あたかも回折をしないかのように細いビーム幅を保って長い距離を伝搬する「長距離伝搬非回折ビーム: LRNB(long range nondiffracting beam)」が発見された⁽¹⁾。このビームは、球面波の波面を周辺にいくに従って曲率が小さくなるように歪ませることによって生成可能である。元のビームの口径の中心部にエネルギーが集中し、細い芯状のビームが生成され、これが LRNB になる。ある距離での光波面の強度プロファイルは、フレネル積分を行うことによって、正確に求めることができるが、中心部に強度の強い LRNB に相当する主ローブが、その周辺には強度がずっと弱いサイドローブが、各々生成される。

LRNB を理論、実験、両面で解析した結果、次のような特性が明らかになっている。

- 1) 主ローブに相当する LRNB は大気中伝搬の際、サイドローブより安定している⁽²⁾
- 2) LRNB は、一般のビームより伝搬による大気の影響を受けにくい⁽²⁾
- 3) 回折限界のビーム幅より狭いビーム幅となり、送受信光学システムとして超高分解能が得られる⁽³⁾

3. おわりに

LRNB は従来の光ビームでは得られない種々の特徴を有しており、今後多くの応用が期待できる。

参考文献

- (1) T. Aruga, Appl. Opt., Vol. 36, p. 3762(1997).
- (2) T. Aruga, S. W. Li, S. Yoshikado, M. Takabe and R. Li, Appl. Opt. Vol.38, p.3152(1999).
- (3) T. Aruga and S. W. Li, Appl. Opt. vol. 38, p.2795(1999).

Fig. 1 Example of LRNB generation

Fig. 2 Comparison of LRNB's pattern (solid line) and usual diffraction limited beam's pattern (dotted)

○森 正和、鈴木 基仁、水池 秀仁、後藤 俊夫*、山根 一雄** (愛知工業大学、名古屋大学*、富士通株式会社**)

Masakazu Mori, Motohiro Suzuki, Hidehito Mizuchi, Toshio Goto*, and Kazuo Yamane**

(Aichi Institute of Technology, Nagoya University*, FUJITSU Limited**)

はじめに 百 GHz 以上の高繰り返し光パルス列を光伝送や光信号処理に応用する上では、繰り返し周波数の安定化が不可欠である。今回、電気的信号処理が可能な繰り返し周波数で安定化処置を施すとの考えの下に、全光学的原理によるモード同期パルス列の繰り返し周波数の分周法と通倍法を検討したので報告する。

分周 二分周の場合を考える。モード同期した、縦モード周波数間隔 f_0 の F-P LD₁ 出力を、縦モード周波数間隔 $f_0/2$ の F-P LD₂ に図 1 の周波数配置で注入する。これにより、F-P LD₁ の各縦モード出力を励起光として、F-P LD₂ の縦モードが二つずつ組となって相互注入同期する。F-P LD₂ の利得が十分大きければ、相互注入同期した縦モードの組同士が四光波混合により注入同期し、全縦モードの位相が揃って F-P LD₂ はモード同期状態となる[1]。縦モードの相対位相を解析すると 8 つの状態が可能であることが分かる。電界の包絡線に直すと、入出力パルスの相対関係としては、出力パルスは入力パルスと同じ時刻か、あるいは半周期ずれた時刻に発生するという二つの状態のいずれかになる。

同様な手法で三分周も可能である。この場合には、縦モードの相対位相として 12 の状態が可能であるが、入出力パルスの相対関係としては、二分周と同じく二つの状態のみとなる。

通倍 注入同期のみを用いた通倍手法[2][3]を F-P LD へ適用するには、例えば図 2 の周波数配置とすればよい。同図は二通倍の場合であるが、任意の通倍も可能である。一方、相互注入同期を用いた通倍も可能である。図 1 の周波数配置で、モード同期した F-P LD₂ 出力を F-P LD₁ に注入する。F-P LD₂ の隣接した縦モードを励起光とした非縮退四光波混合によって、F-P LD₁ の縦モードが相互注入同期し、モード同期状態となる。

まとめ 全光学的原理によるモード同期パルス列の繰り返し周波数の分周法と通倍法を検討した。その結果、注入同期と相互注入同期を併用することが有効であることが分かった。

- 参考文献 [1]H.Kasuya et al., *Appl. Phys. Lett.*, **75**, pp.13-15(1999)
 [2]N.J.Traynor et al., *Electron. Lett.*, **35**, pp.566-567(1999)
 [3]Y.J.Wen et al., *Electron. Lett.*, **36**, pp. 879-881(2000)

図 1 二分周の原理

図 2 二通倍の原理

田村公一、中沢正隆 (NTT未来ねっと研究所フォトニックトランスポートネットワーク研究部)

K. R. Tamura and M. Nakazawa (NTT Network Innovation Laboratories, Photonic Transport Network Systems Laboratory)

はじめに: 2000年9月に伝送速度1.28 Tbps (10 Gbps x 128) の光時間多重 (optical time division multiplexed - OTDM) 伝送実験が報告され、初めて単一波長で伝送速度が1 Tbpsを超える光伝送が実現された [1]。テラビットクラス OTDM [1,2] の基盤技術の一つが低ジッターな高繰り返しフェムト秒光源であるが、我々は再生モード同期ファイバレーザ (regeneratively mode-locked fiber laser - RMFL) を光源として用いている (図1) [3]。この RMFL を用いてピコ秒パルス列を容易に発生することができ、繰り返し10 GHzで時間ジッターが100 fs以下であることが報告されている [4]。しかし、RMFL から直接フェムト秒パルスを発生することが困難であるため、レーザの外部で分散フラット分散減少ファイバ (dispersion-flattened dispersion decreasing fiber - DFDDF) および分散フラット分散非対称非線形ループミラー (dispersion imbalanced nonlinear optical loop mirror - DI-NOLM) の組み合わせからなるベDESTALフリー光パルス圧縮器を用いることが有効である (図1) [5]。DFDDFのみを用いた場合、レーザから出力されたピコ秒パルスが100 fs程度まで圧縮されるが、完全な圧縮を実現することが現状では困難であるため、通常は圧縮されたパルスにベDESTAL成分が発生する。DI-NOLMは透過率が入力強度および入力パルス幅に依存する全光スイッチであり、DFDDFの出力側に直接接続することによってベDESTAL成分がパルスのピーク強度から-35 dB以下であるS/Nが良いフェムト秒パルスを得ることができる。

動作特性: 図1の光源を用いて発生したそれぞれのパルスの自己相関波形を図2に示す。灰色の破線が RMFL の出力であり、パルス幅3 psのトランスフォーマリミットなパルスである。長さ1 kmのDFDDFにより、パルス幅100 fs程度まで圧縮されるが、大きなベDESTAL成分が残ることが分かる (黒い破線)。スペクトル領域ではベDESTAL成分は狭帯域のスパイク成分として現れる。しかし、DI-NOLMを透過することによってベDESTAL成分が取り除かれ、パルス幅150 fsのトランスフォーマリミットなフェムト秒パルスが出力される (実線)。挿入図がDI-NOLMの出力スペクトルであり、スパイク成分が存在しないことが分かる。最近我々は圧縮器のバンド化を行い、偏波が安定かつ動作条件が無調整である圧縮器を実現した。バンド型DFDDFからパルス幅54 fsの極めて細いパルスを得ることに成功した [6]。

文献: [1] M. Nakazawa et al., *ECOC 2000*, PD2.6. [2] T. Yamamoto et al., *PTL*, p363, 2000. [3] E. Yoshida et al., *Electron. Lett.* 34, p1, 1998. [4] E. Yoshida et al., *PTL*, p548, 1999. [5] K. R. Tamura et al., *PTL*, p230, 1999. [6] 田村公一ら、2000年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、C-4-8。

図1: フェムト秒光源の構成図。

図2: 出力パルスの自己相関波形およびスペクトル。

1. はじめに 敷設された光ファイバの零分散波長は温度変化、引っ張り歪み等の環境変化によって変化する。この分散変動は、超高速 TDM 伝送では高速化、長距離化を阻む問題となる。そのためシステム運用中に分散変動を等化する適応等化技術が重要となってくる。今回、適応等化への応用を目指して自動分散等化器を作製し、その分散等化特性の評価実験を行なったところ、良好な結果を得たので報告する。

2. 自動分散等化器の作製 非線形チャープファイバグレーティング(NLCFG)対を用いて自動分散等化器を作製した。これは、2種類のNLCFGと4ポート光サーキュレータとにより構成し、分散シフトファイバ (DSF) の群遅延プロファイルと逆の群遅延プロファイルを実現した [1] 上で、さらに、この逆群遅延プロファイル (等化領域) を積層型 piezo素子 (Multi-Layer Piezoelectric transducer: MLP) の伸縮によって可変することにより、分散値を制御可能としたものである。

3. 分散等化特性 MLP に電圧を印加して自動分散等化器の等化領域可変性を測定した。その結果、50V の電圧印加に対して、長波長側へ連続的に等化領域が7 nm シフトすることが確認された。

適応等化の可能性を検証するため、異なる零分散波長の DSF の分散を等化する実験を行なった。その結果を図1に示す。1550 nm、1552 nm に零分散波長を持つ66 kmのDSFの双方において、等化後の相対群遅延は概ねフラットになっており、広帯域 (約6 nm) にわたって等化されていることが分かる。実際の地下ケーブルにおいては、最大40℃温度変化があるとされており (北海道内陸部)、これは最大1.2 nmの零分散波長変化に対応する (分散スロープが0.07 ps/km/nm²の場合、最大分散値変化量は0.084 ps/km/nm)。本等化器は、1.2 nm以上の連続的な零分散波長可変量を持つため、適応等化に充分応用可能である。

分散等化の性能を検証するため、ファイバレーザからの超短パルスのパルス幅特性を調べた。その結果を図2(a)、(b)に示す (sech型パルスとしてパルス幅を計算した)。図2(a)より、零分散波長が1550 nmのDSFを通して広がったパルス幅は、等化器によって広帯域にわたって一括に、入力パルス近くまでパルス幅が戻っていることがわかる。等化領域をシフトさせることにより、図2(b)のように零分散波長が1552 nmのDSFにおいてもパルス幅が減少した。以上の結果から、本等化器は広帯域にわたって3次分散を含めて分散等化でき、さらに、等化領域可変性を実現していることが分かる。

[1] T. Komukai, T. Inui, and M. Nakazawa, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, pp. 409-417, 2000

図1 異なる零分散波長を持つDSFの分散等化

図2 分散等化におけるパルス幅特性

40GHz Figure-of-Eight Fiber Laser

S.Y. Set, C.S. Goh, 菊池 和朗 (東京大学先端科学技術研究センター)

S.Y. Set, C.S. Goh, and K. Kikuchi

(Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguroku, Tokyo 153-8904, Japan)

sys@ginjo.rcast.u-tyokyo.ac.jp

In this paper, to the first time of our knowledge, we present a novel figure-of-eight configuration fiber laser run at a record high repetition rate of 40 GHz.

This laser is passively mode-locked by nonlinear amplifying loop-mirror (NALM) incorporating a sampled fiber Bragg grating. The layout of the laser is depicted in Fig.1. The laser consisted of a bi-directional EDFA with saturated output power of approximately 10dBm and a 20m of dispersion-shifted fiber (with $\lambda_0=1552\text{nm}$) for introducing nonlinearity to the NALM loop. The sampled grating shows both the Fabry-Perot and bandpass filter features. Its free spectral range (40GHz) with a finesse of 10, confines the lasing linewidth separation to 0.32nm. On the other hand, its spectral envelope centred at 1531nm acts as a bandpass filter to suppress the supermode noise [1].

The SHG autocorrelation trace of the 40GHz repetition rate laser output is shown in Fig.2. The single pulse SHG trace has the FWHM pulse width of 2.3ps. The 3dB spectral bandwidth is about 2.86nm with centre wavelength at 1531nm, corresponded to the sample grating spectral envelope centre wavelength. The produced pulses are chirp and can be compensated with the correct length of SMF. The time bandwidth product thus obtained is 0.32, implying near-transform limited soliton pulses.

By using sample grating that has narrower sampling period, higher repetition rate also able to be achieved, increases the flexibility of the laser.

[1] M. Nakazawa *et al.*, Electron. Lett. **32**, 461-463 (1996).

Fig. 1. Layout of the figure-of-eight laser

Fig.2. Autocorrelation trace of 40GHz pulse train