

# 最近の技術から

## ファイバレーザー

中 沢 正 隆

NTT アクセス網研究所光通信線路研究部 〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 162

### 1. ま え が き

半導体レーザー励起のエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA: erbium-doped fiber amplifier) が1989年に実現してから早5年が過ぎた。EDFAはシリカ系光ファイバの損失が最小となる $1.55\ \mu\text{m}$ 帯の光信号を増幅できる。このため、光通信の分野において盛んに研究が行われるとともに、OTDRや光サンプリングなどの光測定技術、ならびにファイバレーザーによる超短パルス発生技術などさまざまな分野へ応用され始めている。EDFAは高利得、低雑音、無偏波依存性、広帯域、高飽和出力など優れた特徴をもつため、このような幅広い応用が実現したものと考えられる<sup>1)</sup>。

本論文では筆者らが取り組んできたファイバレーザーによる超短パルス発生技術について述べる。まず、非線形偏波回転を用いたフェムト秒ファイバレーザーについて報告し、高調波-再生モード同期レーザーによる10 GHz帯のピコ秒パルスの発生とそのフェムト秒化について述べる。

### 2. 非線形偏波回転を用いたフェムト秒エルビウムファイバレーザー

フェムト秒ファイバレーザーとして最近注目されているのは、非線形偏波回転によるスイッチングを用いたファイバレーザーである<sup>2)</sup>。非線形偏波回転とは光強度に依存して伝搬する光の直交する2つの偏光の間に位相差が生じ、その2つの成分からなる楕円偏波面が自分自身で超高速に回転する現象である<sup>3)</sup>。非線形偏波回転を用いたフェムト秒ファイバレーザーの構成を図1に示す<sup>4)</sup>。レーザーの共振器長は3.6 mであり、励起光源には中心波長 $1.48\ \mu\text{m}$ の半導体レーザーを使用している。偏光子を偏波依存形アイソレーターに対して点対称の位置に置くことにより、連続波の成分を完全に除去することができるのがこのレーザーの特徴である。このレーザーから中心波長 $1.55\ \mu\text{m}$ 、繰返し56 MHz、パルス幅

136 fsのパルスが安定に発生でき、出力パルスはほぼトランスフォームリミットな sech 形パルスになっている。

### 3. 高調波-再生モード同期エルビウムファイバレーザー

前節では繰返しが100 MHz程度のフェムト秒光源を報告したが、超高速光通信を実現するためには、GHz帯で動作する超短パルス光源の実現が重要である。一般に強制モード同期ファイバレーザーの共振器長は他のモード同期レーザーの共振器長よりずっと長いと、熱膨張や微弱な振動などの小さな摂動が加わると、不安定になりやすい。したがって短時間きれいな短パルスを発生させておくことは可能であるが、長時間にわたって最適な動作状態を維持することは難しい。

しかし、この問題は再生モード同期の技術を用いることで克服できる。高調波-再生モード同期ファイバリングレーザーの構成を図2に示す<sup>5)</sup>。レーザーの縦モード間の高調波ビート信号を得るために、出力信号の一部が高速受光器、Q値が高い狭帯域誘電体フィルター ( $Q=1,400$ )、および高利得電気増幅器から構成されるクロック抽出器に入射する。誘電体フィルターの中心周波数は

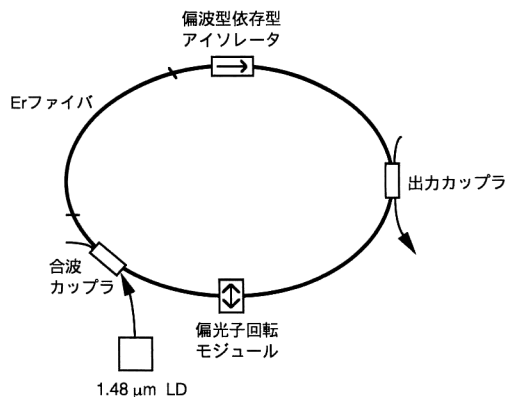


図1 非線形偏波回転を用いたフェムト秒ファイバレーザー

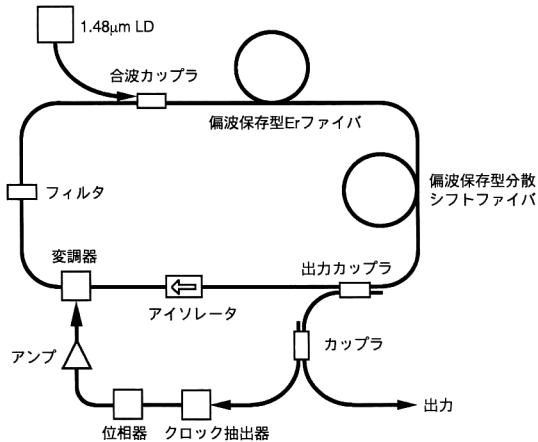


図2 高調波-再生モード同期ファイバレーザ

10 GHz に設定されている。光パルスと変調信号との間の位相を調整した後、高調波のビート信号を増幅して、LiNbO<sub>3</sub> の強度変調器に印加することにより、再生モード同期が実現される。共振器内のファイバはすべて偏波保存ファイバにより構成されている。

本レーザからは波長 1.55 μm、繰返し 10 GHz、パルス幅 2.7 ps のトランスフォームリミットな sech 形パルスが長時間にわたって安定に得られている。このパルスは超高速ソリトン通信の光源として有望であり、80 Gbit/s—500 km および 160 Gbit/s—200 km のソリトン伝送実験に用いられた。

#### 4. エルビウムファイバ増幅器を用いた 1.55 μm 帯 170 fs—10 GHz パルス列の発生

テラビット級の超高速光通信を実現するためには GHz 領域でフェムト秒パルス列を発生させることが重要である。ここでは安定なファイバレーザと分散が徐々に変化している特殊エルビウムファイバ増幅器 (DD-EDFA: dispersion-decreasing erbium-doped fiber amplifier) を用いて達成した 170 fs、10 GHz のパルス発生について述べる<sup>9)</sup>。もとの光源は前節で述べた 10 GHz 帯高調波-再生モード同期ファイバレーザである。この光源からのパルスは高出力 EDFA によって DD-EDFA のソリトン領域にまで増幅される。DD-EDFA の長さは 1 km であり、群速度分散は始端の 9.3 ps/km/nm から終端の 0.5 ps/km/nm まで線形に減少している。高出力のピコ秒パルスが DD-EDFA に入射すると、2 種類のソリトンの断熱圧縮過程によりパルスはかなり短くなる。1 つは分散の減少によるソリト

ンの断熱圧縮である。もう 1 つは光増幅によるソリトンの断熱圧縮である<sup>7)</sup>。

この方法を用いることにより、パルス幅 170 fs、繰返し 10 GHz のパルス列が発生できている。その際スペクトルはソリトンの自己周波数シフト<sup>8)</sup>により、中心波長が 1.552 μm から 1.558 μm へ長波長側に移行した。圧縮したパルスはトランスフォームリミットな sech 形のパルスに近い。この出力パルスはフェムト秒光ソリトン通信の光源として利用できる。

## 5. む す び

各種エルビウムファイバレーザについて、超短パルス発生観点から報告した。受動モード同期ファイバレーザは繰返しは 100 MHz 程度と遅いが、100 fs 程度の短いパルスが発生できることが特徴である。繰返しを 10 GHz と高くした場合のフェムト秒パルスの発生方法として、高調波-再生モード同期レーザと DD-EDFA を組み合わせる方法を報告した。10 GHz—170 fs のパルス列は将来の超高速通信の光源として大きな役割を果たすであろう。

## 文 献

- 1) 中沢正隆: “Er ドープ光ファイバーによる光増幅とその応用”, 応用物理, **59** (1990) 1175-1192.
- 2) K. Tamura, H. A. Haus and E. P. Ippen: “Self-starting additive pulse mode-locked erbium fibre ring laser,” Electron. Lett., **28** (1992) 2226-2228.
- 3) R. H. Stolen, J. Botineau and A. Ashkin: “Intensity discrimination of optical pulses with birefringent fibers,” Opt. Lett., **7** (1982) 512-514.
- 4) M. Nakazawa, E. Yoshida, T. Sugawa and Y. Kimura: “Continuum suppressed, uniformly repetitive 136 fs pulse generation from an erbium-doped fibre laser with non-linear polarisation rotation,” Electron. Lett., **29** (1993) 1327-1329.
- 5) M. Nakazawa, E. Yoshida and Y. Kimura: “Ultrastable harmonically and regeneratively modelocked polarisation-maintaining erbium fibre ring laser,” Electron. Lett., **30** (1994) 1603-1605.
- 6) M. Nakazawa, E. Yoshida, H. Kubota and Y. Kimura: “Generation of a 170 fs, 10 GHz transform-limited pulse train at 1.55 μm using a dispersion-decreasing, erbium-doped active soliton compressor,” Electron. Lett., **30** (1994) 2038-2040.
- 7) M. Nakazawa, K. Kurokawa, H. Kubota and E. Yamada: “Observation of the trapping of an optical soliton by adiabatic gain narrowing and its escape,” Phys. Rev. Lett., **65** (1990) 1181-1184.
- 8) J. P. Gordon: “Theory of the soliton self-frequency shift,” Opt. Lett., **11** (1986) 662-664.

(1995年3月20日受理)