

コヒーレントライダ用の高ピークパワー光ファイバ増幅器

High-peak power optical fiber amplifier for Coherent Doppler LIDAR

崎村武司¹、関浩二¹、安藤俊行¹、亀山俊平¹、浅香公雄²、平野嘉仁¹、田中久理³、井之口浜木³

¹三菱電機(株)情報技術総合研究所、²三菱電機(株)通信機製作所、³宇宙航空研究開発機構

Takeshi SAKIMURA¹, Koji SEKI¹, Toshiyuki ANDO¹, Shumpei KAMEYAMA¹, Kimio ASAKA², Yoshihito HIRANO¹
Hisamichi TANAKA³, Hamaki INOKUCHI³

¹Mitsubishi Electric Corporation, Information Technology R&D Center, ²Mitsubishi Electric Corporation, Communication Systems Center

³Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA)、e-mail: Sakimura.Takeshi@ct.MitsubishiElectric.co.jp

Abstract: An Er³⁺/Yb³⁺ fiber (EYDF) amplifier for generating high-peak power of optical pulses has been developed for Coherent Doppler LIDAR (CDL) system at wavelength of 1.5 micron. The 3.5m length and 9.6 μm core diameter EYDF enables to be obtained spatially single-mode pulse whose energy of 58 micro joule at pulse repetition rate of 4kHz without any onset of Stimulated Brillouin Scattering.

1. はじめに

コヒーレントドップラライダ (CDL) は遠隔の風速場を計測できる測器として、気象学研究、航空機が誘発する後方乱気流の検出、さらに航空機前方の晴天乱気流 (CAT) 検出など多方面から期待されている。我々はアイセーフ波長 1.5 μm を測定光に用いた CDL を世界に先駆けて開発し[1]、また光ファイバ部品により光回路を構成した全光ファイバ型 CDL を製品化している[2,3]。全光ファイバ型 CDL は小型で高信頼の光送受信機を安価に構成できるメリットがあるが、最大計測距離が 1.5km 程度に留まっていた。これは送信用光ファイバ内で発生する誘導 Brillouin 散乱 (SBS) により送信パルス光のピークパワーが 10W、エネルギーが 5 μJ 程度に制限されるためである。

一方、CDL を用いた航空機搭載型 CAT センサの実現には、上空 10km における前方風の計測距離 9.3km が必要とされる。このための送信光エネルギーとして以下の 3 段階の要求があげられている[4]。

①地上 計測距離 3 NM (5.6km) 版: パルスエネルギー 75 μJ、1kHz 相当

②地上 計測距離 5 NM (9.3km) 版: パルスエネルギー 350 μJ、1kHz 相当

③上空 10km 計測距離 5 NM (9.3km) 版: パルスエネルギー 3.5mJ、1kHz 相当

このうち、要求①②を全光ファイバ型の光源構成で、要求③を全光ファイバ型光源に導波路型光アンプを組み合わせた方式[5]で開発を進めている。ここでは、①のために新たに開発した高ピークパワー光ファイバ増幅器の設計、製作評価結果について述べる。

2. 高ピークパワー光ファイバ増幅器構成

高スペクトル純度のパルスレーザが光ファイバコア内を伝送する際に Stimulated Brillouin Scattering (SBS) が誘発される。SBS は音響波により光ファイバコア屈折率が変調され、これにより送信光が後方散乱される非線形光学効果であり、式 (1) であらわされる発生しきい値 (SBS しきい値) を持つことが知られている[6]。

$$P_{th} \cong 21 \frac{A_{eff}}{g_B \cdot L_{eff}} \quad (1)$$

ここで g_B はブリルアン利得係数、 A_{eff} および L_{eff} はそれぞれ有効コア面積、有効相互作用長を示す。SBS しきい値引き上げのためには、有効コア面積を増加、または有効相互作用長・ブリルアン利得係数を減少させる必要がある。1.5 μm 帯で用いられる石英系のシングルモード光ファイバにおいて、ブリルアン利得係数は 5e-11 m/W 程度の定数であり、有効コア面積と有効相互作用長のいずれかが制御パラメータとなる。我々はシステム①における SBS 引き上げのアプローチとして光ファイバ増幅器の短尺化により有効相互作用長の低減する方針とした。構成として従来の全光ファイバ型 CDL の出力段光ファイバ増幅器 (モードフィールド径 (MFD) ϕ 5.7 μm、ファイバ長 ~20m) の後段に MFD ~10 μm、長さ L[m] の短尺光ファイバ増幅器を接続する。有効コア面積増加により約 3 倍、短尺化により 20/L 倍の SBS しきい値引き上げが期待できる。またシングルモードファイバと同程度の MFD により全てのファイバ部品を融着接続でき低損失で高信頼のシステムを実現できる。さらに効率よくコア励起可能なシングルモード型の WDM (Wavelength Division Multiplexer) を用いることができる。

3. Er³⁺/Yb³⁺共添加光ファイバ (EYDF)

Erbium 添加光ファイバ増幅器の増幅利得は光ファイバ増幅器の長さ と Er³⁺添加濃度との積（濃度条長積）に比例する。したがって増幅利得を維持したまま光ファイバ増幅器を短尺化するためには Er³⁺添加濃度を高める必要がある。しかし、Er³⁺添加濃度を増加させると Er³⁺間相互作用により増幅効率の低下が生じる（濃度消光）ことが知られており、純 SiO₂ ホストの濃度限界値は数百 wt-ppm 程度と報告されている[7]。一方、Er³⁺と同程度のイオン半径を持つ Ytterbium (Yb) を共添加させた場合、Er³⁺間に Yb が配位することによる実効的な Er³⁺間距離拡大により濃度消光の抑圧効果が期待できる。上記を踏まえ、Er³⁺濃度 7600wt-ppm、コア径 9.6 μ m のシングルモード型の Er³⁺/Yb³⁺共添加光ファイバ (EYDF) を三菱電線工業と共同で開発した。励起光として Yb による吸収の影響のない 1480nm の波長帯のシングルモード出力半導体レーザを用いた[7]。Fig.1 に長さ 3.5m の EYDF を 1480nm の双方向励起で光ファイバアンプを構成し、信号光強度+0dBm とした場合の連続 (CW) 光増幅特性を示す。スロープ効率は約 40%であった。

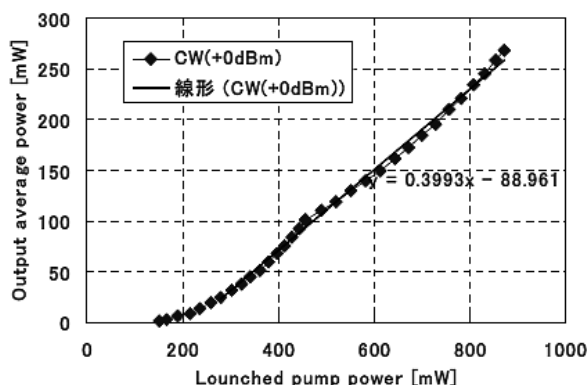


Fig.1 Characteristics of EYDF operating as CW amplifier

4. EYDF 光増幅器の装置構成

Fig.2 に高ピークパワー光ファイバ増幅器の装置構成を示す。DFB ファイバレーザ（波長 1548nm、パワー15mW）の連続光出力を音響光学変調器 (AOM) によりパルス切り出しを行い、光ファイバ増幅器 (MFD ϕ 5.7 μ m、ファイバ長 20m) を用いてパルス増幅（パルス幅 1~1.5 μ s、繰返し 1~16kHz）して、高ピークパワー光ファイバ増幅器のパルス種光とした。パルス種光のピークパワーは SBS しきい値以下の約 10W に設定した。さらにパルス OFF 期間に含まれる自然放出光 (Amplified Spontaneous Emission : ASE) を抑圧するため、第2の AOM を用いて再度パルス切り出しを行った。Fig.3 にパルス再切り出し後のパルス波形（高ピークパワー光ファイバ増幅器の入力パルス）を示す。

高ピークパワー光ファイバ増幅器は、新規開発した EYDF (MFD ϕ 8.3 μ m、ファイバ長 3.5m.) を WDM カプラを用いて 1480nm 帯のシングルモード出力半導体レーザによる双方向励起で構成した。

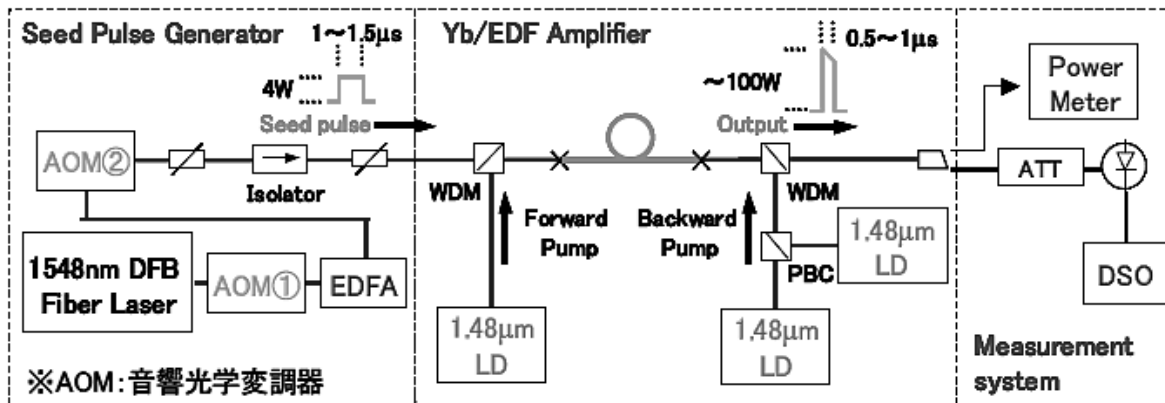


Fig.2 Experimental setup of high-peak power optical fiber amplifier.

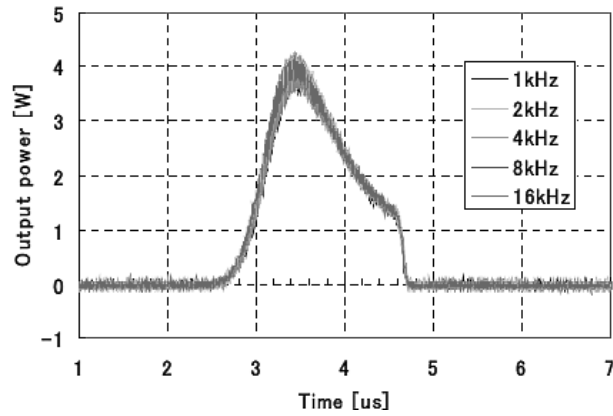


Fig.3 Temporal pulse shapes of input optical pulses for EYDF

Fig. 4 に、パルス繰返し周波数 1kHz, 4kHz, 16kHz に対する高ピークパワー光ファイバ増幅器の出力パルス波形を示す。繰返し周波数を低下させるごとにピークパワーは増加し、繰返し 1kHz におけるピークパワーは 120W であった。またパルス波形は安定しており SBS 発生時に特有の波形乱れは現れなかった。Fig.5 に繰返し 1kHz において前方励起パワーを増加させた場合の時間履歴波形を示す。ピークパワー 125W を超えた場合にパルス立ち上がりから 200ns 付近に SBS による波形乱れが現れた。得られた SBS しきい値 125W は、種光用の光ファイバアンプと EYDF 光ファイバアンプとの有効コア面積比 ~ 2.1 倍、ファイバ長比 ~ 5.7 倍から想定される SBS しきい値の増加量 ~ 12 倍に良く一致する結果と考えられる。

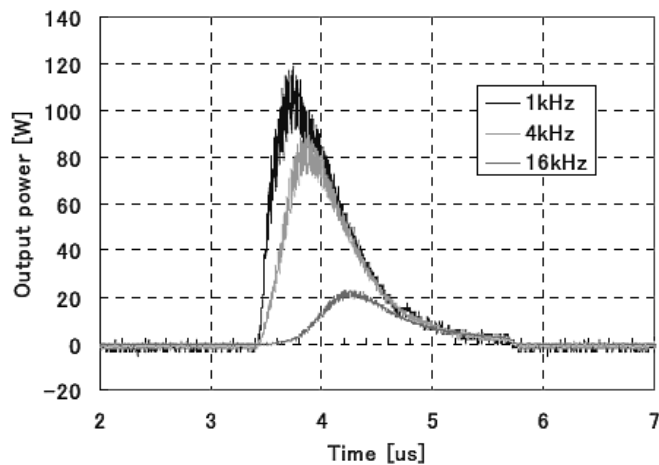


Fig.4 Temporal pulse shapes of output optical pulses from EYDF

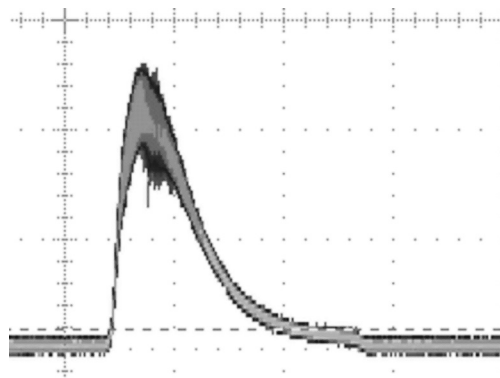


Fig.5 Cumulative waveform of output optical pulse from EYDF after SBS occurred.

Fig.6 にパルス繰返し周波数（PRF）に対する出力エネルギーの測定値を示す。実線は要求①のパルスエネルギー要求値 $75 \mu\text{J}$ 、PRF 1 kHz を基準として、PRF の N 倍の増加に対して要求値が \sqrt{N} 倍となる換算により求めた理論値を併記した。

これを見ると、PRF が 2kHz から 8 kHz まで要求値を満たしていることが分かる。

また、PRF=4 kHz においてパルス出力は $58 \mu\text{J}$ が得られ実測値と要求値との差は最大となった。

この結果に基づき、要求値に対する最大マージンが得られる 4 kHz をコヒーレントライダのオペレート条件として設定した。

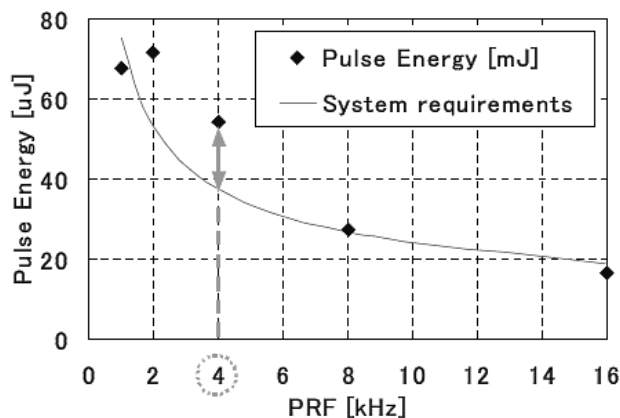


Fig.6 Relationship between output pulse energy and PRF.

5. まとめと今後の展望

航空機搭載型 CAT センサの地上実証モデル（地上での最大計測距離 5.6 km）の実現に向けた高ピークパワー光ファイバ増幅器の開発を行った。全光ファイバ型 CDL 製品の出力段に用いられる光ファイバ増幅器に比較して、有効コア面積比で 2.1 倍、ファイバ長比で 5.7 倍となる $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共添加光ファイバ増幅器を新規設計試作し、全光ファイバ型 CDL 製品の送信光後段にファイバ接続する構成とした。これにより出力光の制限要因であった SBS しきい値の増加（従来値 10W から 125W）が確認された。

また、パルス繰返し周波数 4kHz において出力パルスエネルギー $58 \mu\text{J}$ （システム要求値に対するマージン +1.9dB）が得られた。一方、本報告における光ファイバ増幅器をコヒーレントドップラライダに組みこんでの風速測定評価では地上での最大計測距離として 8 km が得られており、想定した性能が実現できることが確認されている[8]。

現在、地上最大計測距離 9.3km の実証モデル実現にむけた大口径コア光ファイバ増幅器（パルスエネルギー $350 \mu\text{J}$ 、1kHz 相当）の開発と、上空での最大計測距離 9.3km の実証に向けた光導波路型増幅器（パルスエネルギー 3.5mJ 、1kHz 相当）の開発[5]とを並行に進めている。

6. 参考文献

- [1] K. Asaka et al.: "1.5-um Coherent Lidar Using Injection-seeded, LD pumped Er,Yb:Glass Laser", Proc. of 10th CLRC (1999), p198-199
- [2] S. Kameyama et al. : "Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing", Appl. Opt. 46(2007),1953-1962
- [3] 安藤他:「全光ファイバ型ドップラライダの低コスト製品化開発」、第 24 回レーザーセンシング(2005), p161-164
- [4] 水間他:「航空機搭載 CAT センサ用 $1.5 \mu\text{m}$ コヒーレントライダに関する検討」、本研究会予稿集
- [5] 関他:「コヒーレントドップラライダ用の光導波路型増幅器の設計」本研究会予稿集
- [6] G.P. Agrawal: 3rd ed. Nonlinear Fiber Optics, academic press (2001), p360-361
- [7] K.Aiso et al.: "Development of Er/Yb co-doped fiber for high-power optical amplifiers", FTEL Review 20(2001)41-45
- [8]. 安藤他:「中距離版・全光ファイバ型風計測ドップラライダの開発」、本学会予稿集