

## 大口径光ファイバ増幅器の高次伝搬モード抑圧に関する検討

### Study for suppression of higher-order propagation modes in large mode area optical fiber amplifier

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

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

Takeshi SAKIMURA<sup>1</sup>, Koji SEKI<sup>1</sup>, Toshiyuki ANDO<sup>1</sup>, Shumpei KAMEYAMA<sup>1</sup>, Kimio ASAKA<sup>2</sup>, Yoshihito HIRANO<sup>1</sup>  
Hisamichi TANAKA<sup>3</sup>, Hamaki INOKUCHI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mitsubishi Electric Corporation, Information Technology R&D Center, <sup>2</sup>Mitsubishi Electric Corporation, Communication Systems Center

<sup>3</sup>Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA)、e-mail: [Sakimura.Takeshi@ct.MitsubishiElectric.co.jp](mailto:Sakimura.Takeshi@ct.MitsubishiElectric.co.jp)

**Abstract:** An Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped large mode area optical fiber amplifier (LMA-EYDF) is promising for realizing single-frequency high peak power optical pulse sources at wavelength of 1.5 micron because of enhancement of threshold for non-linear optical effects, however LMA fiber may degrade its beam quality due to multi-mode propagation. We have studied an approach for suppressing higher modes by introduction of bend loss in LMA-EYDF. An optimum bending radius of 2cm for core diameter of 25um and its NA of 0.1 has been obtained, which sufficiently suppressed higher modes without any decrement of a fundamental mode.

### 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]。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、最大計測距離は光ファイバ増幅器の高出力化を行った中距離型においても地上 8 km に留まっていた[3]。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制限されるためである。

CDL の最大計測距離を拡大するためには、送信光を高ピークパワー、高エネルギー化する必要があり、このために光ファイバ増幅器の高出力化が求められる。高出力な光ファイバ増幅器には、ダブルクラッド型の大口徑ファイバが利用できる。これは、励起光源として高出力なマルチモード出力半導体レーザを使用できるため、光ファイバ増幅器の高出力化に適しており、大口徑コアにより SBS しきい値の引き上げが期待できる。

一方、大口徑ファイバでは送信光の空間伝搬モードがマルチモード化する問題が生じる。これは、送受信光の結合損失を引き起こす原因となるため、送信光をシングルモード化するための対策が必要となる。大口徑ファイバにおいて、高次伝搬モードを抑圧するための一般的な手法として、ファイバをコイル化し曲げ損失を付加する方法がよく知られている。

ここでは、大口徑ファイバにおいて伝搬可能な各モードの電界強度分布から、曲げ径を変化させた場合の曲げ損失を計算した。さらに、曲げ損失を含めた伝搬方程式から、光ファイバ増幅器を伝搬する信号光の出力パワーを計算し、高次モードを抑圧し基本モード光のみを損失なく出力させるためのファイバのコイル化条件を求めた。

### 2. 各伝搬モードに対する曲げ損失の計算

ここでは、コア径 25 μm、コア NA0.1 の Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共添加光ファイバ (EYDF) について伝搬モードと曲げ損失を計算した。弱導波近似 (比屈折率差≪1) を用いると、光ファイバの導波モードは直線偏波をもつ LP モード (Linear Polarized mode) で表される[4]。コアの屈折率を 1.45 として波長 1.55 μm の信号光に対する電界強度分布を計算すると、LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>12</sub>、LP<sub>02</sub> の 4 モードが伝搬可能であることがわかる。

基本モードである LP<sub>01</sub> モードに比べ、高次モードでは次数が高くなるに従ってクラッド部へのしみだしが増えるため、ファイバの曲げによる損失が増大する。Fig.1 にファイバの曲がりに伴う放射損失に基づいた計算モデル[5]により求めた曲げの曲率半径に対する各モードの伝搬損失を示す。

高次モードほど曲げによる損失が大きく、1 次の高次モードである LP<sub>11</sub> モードは基本モードである P<sub>01</sub> モードと比較して曲げ損失[dB/m]が 4 桁以上大きいことがわかる。

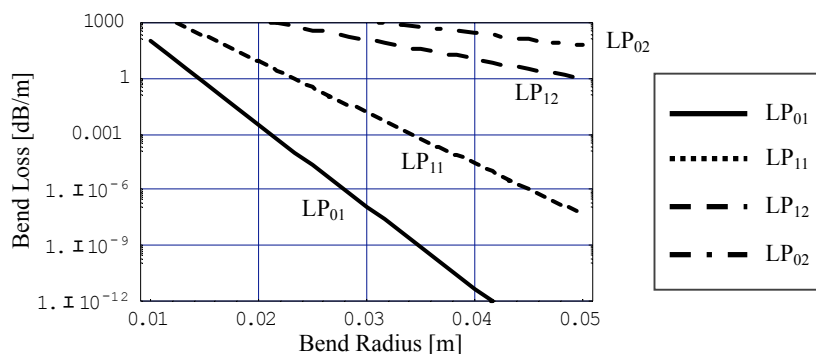


Fig.1 Bend loss for EYDF (25  $\mu$  m core, 0.1 NA)

### 3. 曲げ損失を考慮した EYDF 出力パワー

Fig.2 に曲げ損失を考慮した伝搬方程式から計算した曲げ半径を変化させた場合の EYDF の連続 (CW) 光増幅出力パワーを示す。ただし、励起パワー 20W の前方励起の構成とし、入力した 1.55  $\mu$  m の信号光 100mW がファイバ入力端において各モードに等分されて結合するとした。Fig.2 より、曲げ半径を 2cm とすることにより、LP<sub>01</sub> モードだけを出力させることができることがわかった。また、入射光の条件等を変えて計算した場合においても、高次モード (特に LP<sub>11</sub> モード) を抑圧するためには曲げ半径を 2cm とすることが必要であることがわかった。

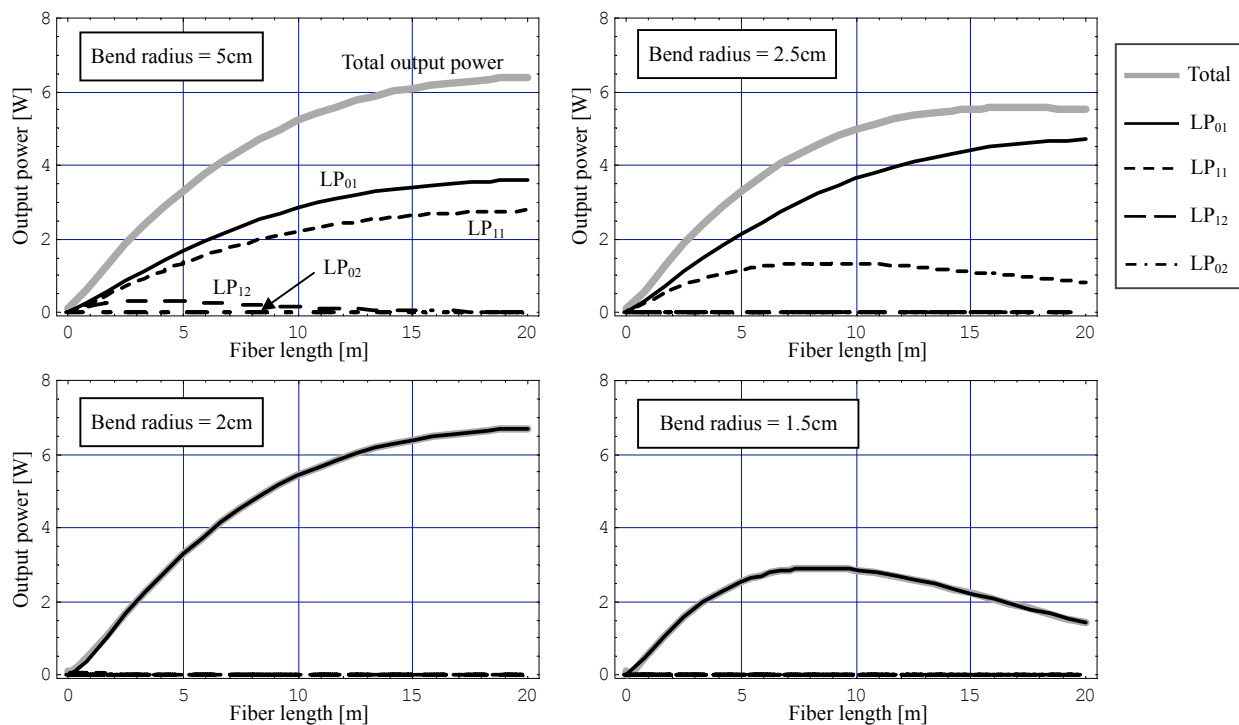


Fig.2 EYDF output power (Forward pump power is 20W, and input signal power is assumed to be coupled to each mode with 1/4 of 100mW at fiber input end.)

### 4. まとめ

大口径光ファイバ増幅器においてシングルモードの出力を得るためのファイバのコイル化条件を求めた。高次モードほど曲げによる損失が大きく、コア径 25  $\mu$  m、コア NA0.1 の EYDF では曲げ半径を 2cm とすることにより基本モードだけを出力させることができることがわかった。

### 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)
- [2] S. Kameyama et al. : "Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing", Appl. Opt. 46(2007)
- [3]. 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」、第 25 回レーザセンシングシンポジウム予稿集
- [4]. D. Gloge, : "Weakly Guiding Fibers", Appl. Opt., Vol. 10, No. 10
- [5]. J. Sakai, et al. : "Bending loss of propagation modes in an arbitrary-index profile optical fibers", Appl. Opt., Vol. 17, No. 10