

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：32706

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04069

研究課題名（和文）フューモード・エルビウム添加ファイバ増幅器の利得制御性の研究

研究課題名（英文）Study on gain controllability of few-mode erbium-doped fibre amplifier

研究代表者

小野 浩孝（Ono, Hirotaka）

湘南工科大学・工学部・教授

研究者番号：00522343

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：フューモード・エルビウム添加ファイバ増幅器（FM-EDFA）をモード分割多重（MDM）光伝送システムやMDM光ネットワークへ適用するための課題の一つに利得制御技術がある。本研究では、2-LPモード及び4-LPモードのFM-EDFAの基礎的利得制御性として、静的利得制御性のシミュレーションによる考察、及び動的利得応答の解析的モデル導出・実験検証を行った。その結果、リングコアEDFを用いたFM-EDFAでは、励起光パワー調整のみで利得制御ができること、及び本研究で導出した動的利得応答の解析的モデルが適用可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モード分割多重（MDM）光伝送システムやMDM光ネットワークへ適用可能なフューモード・エルビウム添加ファイバ増幅器（FM-EDFA）を実現するためには、入力信号光パワー変化時のFM-EDFA利得スペクトル変化に対する励起光パワーによる制御性や利得の周波数応答特性などの基礎的制御性を明確にして制御用電子回路など次の技術検討へつなげていくことになる。本研究の学術的意義は、FM-EDFA基礎的利得制御性の理論的・実験的に初めて明らかにしたことにある。また、本研究の成果によりMDM光伝送システム及びMDM光ネットワークへ適用可能な利得制御機能を有するFM-EDFAの実用化へつなげるものである。

研究成果の概要（英文）：One of the challenges in applying few-mode erbium-doped fiber amplifiers (FM-EDFAs) to mode-division multiplexing (MDM) transmission systems and MDM networks is gain control technology. In this study, as basic gain controllability of 2-LP and 4-LP mode FM-EDFAs, simulation study of static gain controllability and analytical model derivation and experimental verification of dynamic gain response were conducted. As a result, it was found that gain control is possible only by adjusting the excitation power in FM-EDFA with ring-core EDF, and that the analytical model of dynamic gain-response derived in this study is applicable.

研究分野：通信工学

キーワード：フューモード エルビウム添加ファイバ増幅器 利得制御

### 1. 研究開始当初の背景

長距離モード分割多重(MDM)光伝送システム及びMDM光ネットワークでは、複数波長の信号光(一つ一つの波長の信号光を「信号チャンネル」と呼ぶ)を多重する波長分割多重(WDM)信号が信号光のモード毎に伝送される。そのため、FM-EDFAには複数のモード毎にWDM信号が入力されて増幅される。MDM光ネットワークでは、信号光の波長毎またはモード毎の経路(光パス)の切り替えやWDM信号の一部の波長を分岐したり挿入したりするため、FM-EDFAに入力する信号チャンネル数が増減して利得が増減する。また、経年劣化や伝送ファイバへの接触によって伝送ファイバの損失変化が生じ、WDM信号の各信号チャンネル光パワー(1波長あたりの信号光パワーで、以下「信号光レベル」とする)が増減して利得が増減する。さらに、これら信号チャンネル数変化及び信号光レベル変化による利得変化がモード毎に独立に発生する。MDM光伝送システムやMDM光ネットワークの伝送品質を維持するためには、このようなFM-EDFAの入力信号光パワーが増減があっても常にほぼ一定の利得や出力信号光パワーが得られるようにFM-EDFAの利得制御を行う必要がある。

FM-EDFAの利得制御には2つの側面がある。一つは、静的利得制御と呼ばれるもので、定常状態から入力信号光パワーが増減した後、新しい入力信号光パワーの状態に落ち着いた後のFM-EDFA利得スペクトルをほぼ一定に維持する制御である。もう一つは、動的利得制御と言われるもので、定常状態から入力信号光パワーが増減し始め、新しい入力信号光パワーの状態に落ち着くまでの間の利得スペクトルをほぼ一定に維持する制御である。すなわち、利得過渡応答の制御である。これらFM-EDFA利得制御では、FM-EDFAの励起光パワー(エルビウムイオンを光励起するための半導体レーザ光パワー)を、制御用電子回路を用いて調整することが一つの方法として考えられ、その回路実現にはFM-EDFAの周波数応答特性が必要となる。

### 2. 研究の目的

上述の背景に鑑み、①入力信号光パワーが増減に対するFM-EDFA利得スペクトルの変化の励起光パワーによる静的利得制御性、②信号光や励起光に対する利得過渡応答、及び利得の周波数応答特性の動的利得制御性を明らかにすることを本研究の目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では目的を達成するために、(1)静的利得制御性のシミュレーションによる考察、(2)動的利得制御性の理論導出、(3)動的利得制御性の実験検証を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) FM-EDFAの静的利得制御性のシミュレーションによる考察

まず、2-LPモードEDFを用いたFM-EDFAについて検討した。入力信号条件の変化に対する増幅オーバーラップファクタの変化を計算するとともに、FM-EDFAのフルモデルを用いたシミュレーションにより入力信号光条件が増減したときの利得変化を計算した。ここで、増幅オーバーラップファクタとは、コアのエルビウム添加分布、励起されたエルビウムイオン分布、信号光パワー分布の重なり積分で定義され、FM-EDFA特有のパラメータである。全ての信号光モードの入力が40チャンネルのときの各モードの利得スペクトルと、全信号光モードの入力が1チャンネルに変化したときの各モード利得を計算し、これら2つの入力信号光パワー条件下の利得を比較することにより利得制御性を評価した。検討したエルビウム添加ファイバ(EDF)は、円コアと2種類のリングコアである。入力信号光パワーは-20 dBm/ch/modeとした。図1に円コアEDFを用いたFM-EDFAにおける増幅オーバーラップファクタの入力信号光パワー依存性および利得制御性を示す。増幅オーバーラップファクタの入力信号光パワー依存性が小さいLP<sub>11</sub>モード励起では、1チャンネル入力時の利得は各モードとも40チャンネル入力時とほぼ同じ利得となり、制御誤差は0.2 dB未満である。一方、増幅オーバーラップファクタの入力信号光パワー依存性が大きくなるLP<sub>01</sub>モード励起およびLP<sub>21</sub>モード励起では、利得制御誤差は1 dB以上となる。

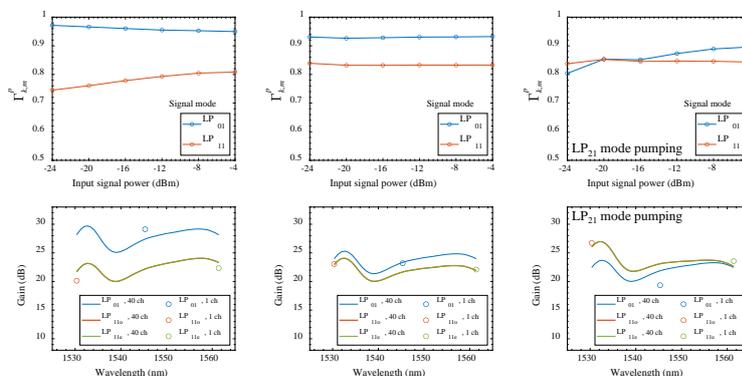


図1 円コア EDF を用いた FM-EDFA における増幅オーバーラップファクタの入力信号光パワー依存性および利得制御性。

図 2 にリングコア EDF-1(モード間利得偏差が小さいリングコア EDF)を用いた FM-EDFA における増幅オーバーラップファクタの入力信号光パワー依存性および利得制御性を示す。リングコア EDF-1 はモード間利得差がほぼゼロとなるように設計され、この EDF を用いた FM-EDFA では、LP<sub>01</sub>モード、LP<sub>11</sub>モード、LP<sub>21</sub>モードのいずれの励起モードにおいても、LP<sub>01</sub>モードと LP<sub>11</sub>モードの利得スペクトルがほぼ重なり、モード間利得差がゼロに近い利得特性が得られる。増幅オーバーラップファクタの入力信号光パワー依存性は励起モード間でほとんど差異がなく、各励起モードにおいて、入力信号光パワーの-24 dBm から-4 dBm の間における増幅オーバーラップファクタの変化は 0.01 未満と小さい。また、利得制御誤差は LP<sub>01</sub>モードにおいて 0.3 dB 未満、LP<sub>11</sub>モードにおいて 0.2 dB 未満、LP<sub>21</sub>モードにおいて 0.3 dB 未満となる。

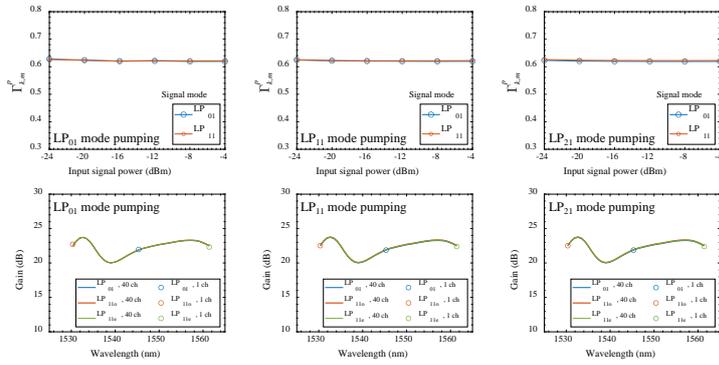


図 2 リングコア EDF-1 を用いた FM-EDFA における増幅オーバーラップファクタの入力信号光パワー依存性および利得制御性。

図 3 にリングコア EDF-2(モード間利得偏差が大きいリングコア EDF)を用いた FM-EDFA における増幅オーバーラップファクタの入力信号光パワー依存性および利得制御性を示す。リングコア EDF-2 は内側半径が EDF-1 と同一であるが、外側半径が EDF-1 より小さく、モード間利得差の観点では最適設計から外れたリングコア EDF である。このため、この EDF を用いた FM-EDFA では、LP<sub>01</sub>モード、LP<sub>11</sub>モード、LP<sub>21</sub>モードの各励起モードにおける LP<sub>01</sub>モードと LP<sub>11</sub>モードのモード間利得差はそれぞれ 8.1、8.2、7.9 dB と大きくなる。一方、増幅オーバーラップファクタの入力信号光パワー依存性は励起モード間でほとんど差異がなく、入力信号光パワーの-24 dBm から-4 dBm の間で増幅オーバーラップファクタはほぼ一定となる。利得制御性も励起モード間でほとんど差異がなく、全励起モードにおいて制御誤差 0.1 dB 未満が得られている。これらの結果から、EDF 断面の励起エルビウムイオン分布が利得制御性に影響を与えることがわかる。励起光パワー調整による利得制御を可能とするためには、増幅オーバーラップファクタの入力信号光パワー依存性が小さいことが条件となると考えられる。

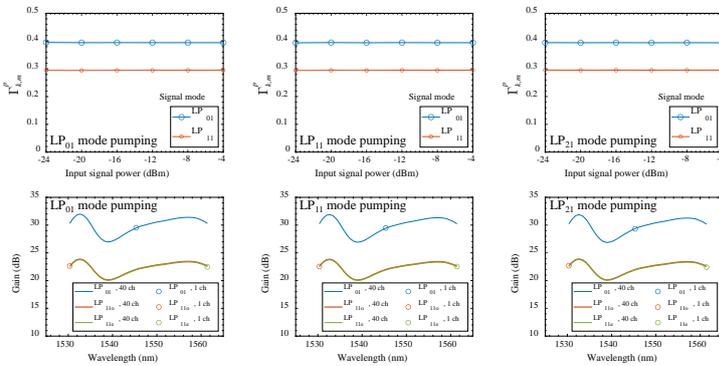


図 3 リングコア EDF-2 を用いた FM-EDFA における増幅オーバーラップファクタの入力信号光パワー依存性および利得制御性。

次に、4-LP モード EDF を用いた FM-EDFA について検討した。まず、信号チャネル数変化に対する利得制御性評価を行った。リングコア EDF として、信号光モードが LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>、LP<sub>02</sub> である EDF(以下 1 型 RC-EDF とする)と、信号光モードが LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>、LP<sub>31</sub> である EDF(以下 2 型 RC-EDF とする)を用いた 4 モード EDFA について、信号チャネル数変化に対する利得制御性をシミュレーションにより調べた。シミュレーションでは、FM-EDFA のフルモデルを用いて、全ての信号光モードの入力が 40 チャネル(1530.33 - 1561.42 nm、100 GHz 間隔)のときの各モードの利得スペクトルと、全信号光モードの入力が 1530.33 nm の 1 チャネルに変化したときの各モード利得を計算した。利得制御性はこれら 2 つの入力信号光パワー条件下の利得を比較することにより評価した。FM-EDFA シミュレーションにおいて、入力信号光パワーは -20 dBm/ch/mode、励起光波長は 980 nm とした。励起光モードとして LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>、LP<sub>02</sub> について調べた。図 4 はリングコア EDF における信号光許容モードマップであり、×、●、■、□で示したコア半径についてシミュレーションを行い、利得制御性を評価した。また、各印の下

に示した数値は最小の利得制御エラー値(単位は dB)である。1型 RC-EDF を用いた 4-LP モード EDFA では、いずれの半径パラメータにおいても利得制御エラーが最小となるは LP<sub>11</sub> モード励起のときであり、各パラメータの最小利得制御エラー値は 0.43 – 1.91 dB であった。2型 RC-EDF を用いた 4-LP モード EDFA では、0.06 – 0.25 dB の範囲の小さい利得制御エラーが得られた。利得エラーが小さくなる励起光モードは半径パラメータにより異なり、●では励起光モードが LP<sub>02</sub> のとき、■および□では励起光モード LP<sub>21</sub> のときに最小利得制御エラーが得られた。なお、□は LP<sub>02</sub> 励起光モードが伝搬許容ではないため■とは区別したものである。

次に、信号光モード変化に対する利得制御性をシミュレーションにより調べた。図 5 はリングコア EDF における信号光許容モードマップであり、×, ■, □で示したコア半径についてシミュレーションを行い、利得制御性を評価した。また、各印の下に示した数値は最小の利得制御誤差(単位は dB)であり、●では励起光モードが LP<sub>02</sub> のとき、■および□では励起光モード LP<sub>21</sub> のときに最小利得制御誤差が得られたことを示している。なお、■と□の差異は、LP<sub>02</sub> 励起光モードの伝搬にあり、■は伝搬許容であるのに対し、□は伝搬許容ではない。タイプ 1 の RC-EDF を用いた 4-LP モード EDFA の達成可能な最小利得誤差はすべて 3 dB 以上であった。一方、タイプ 2 の RC-EDF を用いた 4-LP モード EDFA では、最小利得制御誤差は LP<sub>21</sub> モード励起で得られ、その値は 0.20 – 1.60 dB となった。また、内側コア半径が大きくなると利得制御誤差は小さくなることがわかった。

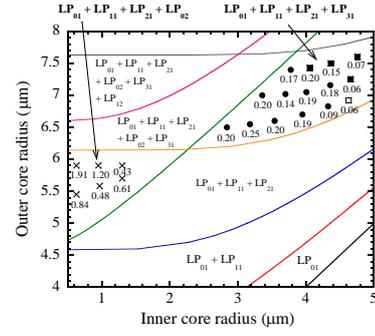


図 4 4-LP モード EDFA における信号光チャ

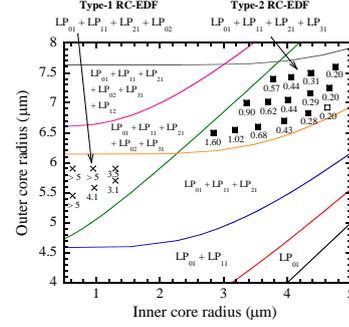


図 5 4-LP モード EDFA における信号光モード変化に対する利得制御性。

## (2) FM-EDFA の動的利得制御性の理論導出

FM-EDFA におけるエルビウムイオンの下準位密度  $\mathcal{N}_1(r, \theta, z, t)$  および上準位密度  $\mathcal{N}_2(r, \theta, z, t)$  のレート方程式とエルビウム添加ファイバ(EDF)の長手方向(z方向)における信号光と励起光の伝搬方程式において、エルビウムイオンの上層密度  $\mathcal{N}_2(r, \theta, z, t)$  は、エルビウムイオンのピーク密度  $\rho_p$ 、EDF コア断面におけるエルビウムイオン分布  $\xi(r, \theta)$ 、上準位密度分布  $\phi(r, \theta, z, t)$ 、EDF 断面で一様化された規格化下準位密度  $N_1(z, t)$  と規格化上準位密度  $N_2(z, t)$  を用いて、以下のように書き換えることができる。

$$\mathcal{N}_2(r, \theta, z, t) = \rho_p \xi(r, \theta) \phi(r, \theta, z) N_2(z, t) \quad (1)$$

ここで、

$$\mathcal{N}_2(r, \theta, z, t) = \rho_p \xi(r, \theta) \phi(r, \theta, z) N_2(z, t) \mathcal{N}_1(r, \theta, z, t) + \mathcal{N}_2(r, \theta, z, t) = \rho_p \xi(r, \theta) \quad (2)$$

$$N_1(z, t) + N_2(z, t) = 1 \quad (3)$$

z軸に関して平均した上準位密度分布である平均上準位密度分布  $\bar{\phi}(r, \theta, t)$  と等価面積  $S_{\text{eff}}(t)$  を導入し、平均反転分布率  $\bar{N}_2(t)$  と出力パワー  $P_{k,m}^{\text{out}}(t)$  を考慮すると次式が得られる。

$$\frac{d\bar{N}_2(t)}{dt} = - \sum_m \sum_k \frac{1}{\rho_p S_{\text{eff}}} P_{k,m}^{\text{in}}(t) \left[ e^{\bar{g}_{k,m}(t)L} - 1 \right] - \frac{\bar{N}_2(t)}{\tau} \quad (4)$$

ここで、

$$\bar{\phi}(r, \theta, t) = \frac{1}{L} \int_0^L \phi(r, \theta, z, t) dz \quad (5)$$

$$S_{\text{eff}}(t) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \xi(r, \theta) \bar{\phi}(r, \theta, t) r dr d\theta \quad (6)$$

$$\bar{N}_2(t) = \frac{1}{L} \int_0^L N_2(z, t) dz \quad (7)$$

$$P_{k,m}^{\text{out}}(t) = P_{k,m}^{\text{in}}(t) e^{\bar{g}_{k,m}(t)L} \quad (8)$$

である。式(4)および(8)において、 $\bar{g}_{k,m}(t)$  は次式で表される平均正味利得係数である。

$$\bar{g}_{k,m}(t) = \rho_p (\sigma_{e,k} + \sigma_{a,k}) \bar{N}_2(t) \bar{\Gamma}_{k,m}^{\text{amp}} - \rho_p \sigma_{a,k} \bar{\Gamma}_{k,m}^{\text{abs}}$$

ここで、 $\bar{\Gamma}_{k,m}^{\text{amp}}$  は増幅オーバーラップファクタ、 $\bar{\Gamma}_{k,m}^{\text{abs}}$  は吸収オーバーラップファクタであり、以下のように定義される。

$$\bar{\Gamma}_{k,m}^{\text{amp}} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \xi(r, \theta) \bar{\phi}(r, \theta) \bar{\psi}_{k,m}(r, \theta) r dr d\theta \quad (9)$$

$$\bar{\Gamma}_{k,m}^{\text{abs}} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \xi(r, \theta) \bar{\psi}_{k,m}(r, \theta) r dr d\theta \quad (10)$$

なお、上記議論では平均的な上準位密度分布は時間に依存しない、すなわち増幅オーバ

ーラップファクタと等価面積は時間に依存しないと仮定しており、この仮定はリングコアエルビウム添加ファイバ(RC-EDF)を持つ FM-EDFA に当てはまる。平均反転レベルの過渡応答は式(4)を用いて計算され、次に任意の信号チャンネルの過渡応答は式(8)を用いて計算できる。

次に、クロスゲイン変調の周波数特性を計算するための FM-EDFA の伝達関数を導出する。入力チャンネルの定常値  $P_{k,m,0}^{in}$  に摂動を与える。

$$P_{k,m}^{in}(t) = P_{k,m,0}^{in} (1 + \Delta p_{k,m}^{in}(t)) \quad (11)$$

ここで  $\Delta p_{k,m}^{in}(t)$  は入力チャンネルパワーの摂動項である。結果として得られる平均反転率と出力

$$\begin{aligned} \bar{N}_2(t) &= \bar{N}_{2,0} (1 + \Delta \bar{n}_2(t)) \\ P_{k,m}^{out}(t) &= P_{k,m,0}^{out} (1 + \Delta p_{k,m}^{out}(t)) \end{aligned}$$

パワーは、定常値  $\bar{N}_{2,0}$  および  $P_{k,m,0}^{out}$  を用いて表すことができる。

ここで、 $\Delta \bar{n}_2(t)$  および  $\Delta p_{k,m}^{out}(t)$  は、それぞれ平均反転レベルと出力チャンネルパワーの摂動項である。

これらの式を用いて、平均反転率の時間微分方程式である式(4)と出力光パワーの微分

$$|\Delta p_{k,m}^{in}(t)| \ll 1, |\Delta p_{k,m}^{out}(t)| \ll 1, |\Delta \bar{n}_2(t)| \ll 1 \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta \bar{n}_2(t) = A \Delta \bar{n}_2(t) + B \Delta p^{in}(t) \quad (15)$$

$$\Delta p^{out}(t) = C \Delta \bar{n}_2(t) + D \Delta p^{in}(t) \quad (16)$$

$$A = -\frac{1}{\rho_p S_{\text{eff}} L} \sum_{i=1}^M e^{(\rho_p(\sigma_i^e + \sigma_i^a) \bar{N}_{2,0} \Gamma_i^{\text{amp}} - \rho_p \sigma_i^e \Gamma_i^{\text{abs}}) L} P_{i,0}^{in} \rho_p (\sigma_i^e + \sigma_i^a) \Gamma_i^{\text{amp}} L - \frac{1}{\tau} \quad (17)$$

$$B(i, j) = -\frac{1}{\rho_p S_{\text{eff}} L \bar{N}_{2,0}} \left[ e^{(\rho_p(\sigma_j^e + \sigma_j^a) \bar{N}_{2,0} \Gamma_j^{\text{amp}} - \rho_p \sigma_j^e \Gamma_j^{\text{abs}}) L} - 1 \right] P_{j,0}^{in} \quad (18)$$

$$C(i, 1) = \rho_p (\sigma_i^e + \sigma_i^a) \Gamma_i^{\text{amp}} L \bar{N}_{2,0} \quad (19)$$

$$D(i, j) = 1 (i = j), 0 (\text{otherwise}) \quad (20)$$

方程式である式(8)から、以下のように表されるシステム方程式が得られる。

ここで、入力と出力の光パワーの摂動項は、異なるモードと波長の複数の要素からなるベクトルにグループ化される。 $M$  は全モードのチャンネル数の和である。入力信号チャンネル・パワー変動に対する出力信号チャンネル・パワーの伝達関数は次式で与えられる。

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (21)$$

ここで  $s$  はラプラス演算子、 $\mathbf{I}$  は単位行列である。信号チャンネル間のクロスゲイン変調の周波数特性は式(21)を用いて計算される。

### (3) 静的及び動的利得制御性の実験検証

導出されたモデルを検証するために、利得過渡応答と周波数応答の実験を行った。実験で用いた FM-EDFA は、長さ 3.2m の 2-LP モード RC-EDF を備えた前方励起増幅器である。励起には波長 980 nm のレーザーダイオード(LD)を使用し、励起モードは LP<sub>01</sub> とした。信号光源には 1548.5 nm と 1550.3 nm の分布帰還型 LD を使用した。両波長の信号光は波長多重の後パワーを分割し、モード合波器によって 1548.5 nm と 1550.3 nm の LP<sub>01</sub> モードと LP<sub>11</sub> モードの多重信号チャンネルを生成した。FM-EDFA の入力信号のうち 1548.5 nm の LP<sub>01</sub> モードチャンネルを変調し、1550.3 nm の信号チャンネルの過渡応答と周波数応答を測定した。FM-EDFA に入力される信号チャンネルのパワーは、1548.5 nm LP<sub>01</sub> モードが -4 dBm、その他を -20 dBm とした。FM-EDFA のゲインは約 20 dB であった。

図 6 に利得過渡応答の計算結果と実験結果を示す。同図は、1548 nm の LP<sub>01</sub> モード信号チャンネルの変調度をほぼ 100% の変調度で時間ゼロにドロップとしたときの、1550.3 nm における LP<sub>01</sub> モードと LP<sub>11</sub> モードの信号利得の応答を示している。実線は計算値、丸印は実測値である。導出モデルでは、自然放出増幅 (ASE) 光による飽和を記述できないこと、およびモード結合効果を見逃していることを考慮すると計算データは実験結果とよく一致しているといえる。図 7 に、クロスゲイン変調の周波数特性の計算結果と実験結果を示す。ここでは、1548 nm の LP<sub>01</sub> モードの信号チャンネルを約 10% の変調度で変調し、1550.3 nm の LP<sub>01</sub> モードと LP<sub>11</sub> モードの信号チャンネルの変調を測定した。計算結果は、両モードの信号とも実験データとよく一致した。

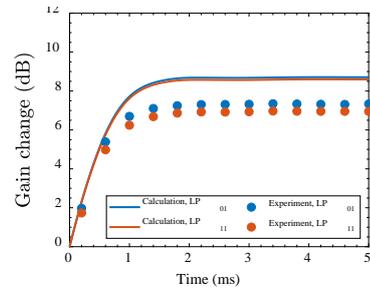


図 6 利得過渡応答の計算値と実験値。

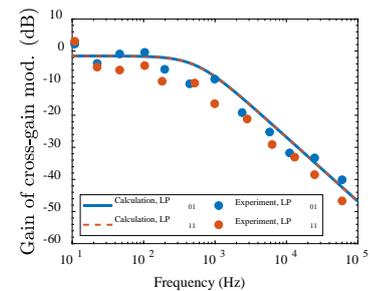


図 7 クロスゲイン変調の計算値と実験値。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ono Hiroataka, Yamada Makoto	4. 巻 36
2. 論文標題 Gain Dynamics of Few-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 500 ~ 503
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LPT.2024.3370940	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小野浩孝, 山田誠
2. 発表標題 信号光モード変化に対するリングコア4-LPモードEDFAの利得制御性
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野浩孝, 山田誠
2. 発表標題 励起光パワー調整によるFM-EDFA利得制御性
3. 学会等名 電子情報通信学会 光ファイバ応用技術研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野浩孝, 山田誠
2. 発表標題 FM-EDFAの利得制御性に対する励起エルビウムイオンのEDF断面分布の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野浩孝, 山田誠
2. 発表標題 励起光パワー調整によるFM-EDFA利得制御性 ~ 4-LPモードの解析 ~
3. 学会等名 電子情報通信学会 光ファイバ応用技術研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野浩孝, 山田誠
2. 発表標題 リングコア4-LPモードEDFAにおける利得制御
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野浩孝, 山田誠
2. 発表標題 平均反転分布率によるFM-EDFAの解析的モデル化
3. 学会等名 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野浩孝, 山田誠
2. 発表標題 FM-EDFA利得制御法についての考察
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------