

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04483

研究課題名（和文）マルチコア光増幅器の全光型高速フィードフォワード利得一定制御

研究課題名（英文）All-optical feedforward fast automatic gain control scheme for multicore optical amplifiers

研究代表者

北村 心（KITAMURA, Kokoro）

島根大学・学術研究院理工学系・助教

研究者番号：60549179

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：我々は、将来の超大容量光ネットワークを支えるマルチコアエルビウム添加ファイバ増幅器に適用可能な全光型フィードフォワード利得一定制御（FF-AGC）方式を提案してきた。本研究では、この全光型FF-AGC回路の高速・高精度化を実現するため、回路構成及びその性能明確化に関する検討を行った。信号光波長帯域を、従来検討のC帯より長波長帯であるL帯としたAGC回路構成について動作特性を明らかにした。また、半導体光増幅器（SOA）を用いたAGC回路において、SOAの偏波依存性の影響を抑制するため新規ダブルパス構成の動作特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の大容量光通信ネットワークを支えている光ファイバ伝送システムは、伝送容量の限界に近づきつつある。将来の超大容量光ネットワークを支える新規空間分割多重技術として、マルチコアエルビウム添加ファイバ増幅器（MC-EDFA）を用いたマルチコア伝送技術の研究が進められている。本研究で検討する全光型FF-AGC方式は、MC-EDFAに適用可能なAGC方式として、世界的に先駆的な研究である。本研究で得られた回路構成およびその動作特性に関する知見は、将来の光ファイバ伝送システムを支えるマルチコア光増幅器の学術的および技術的な発展に寄与する。

研究成果の概要（英文）：We have proposed the all-optical feedforward automatic gain control (FF-AGC) scheme that can be applied to multicore erbium-doped fiber amplifiers in ultra-high capacity optical networks in the future. In this study, we investigated circuit configurations and performances of the all-optical FF-AGC circuit for fast and accurate operations. AGC circuits for L-band, in which signal wavelengths are longer than those in C-band in earlier studies, were studied. Further, AGC circuits using a semiconductor optical amplifier (SOA) were investigated. We clarified the performances of a novel double-pass configuration to suppress the effect of polarization dependences in the SOA.

研究分野：光通信および光計測

キーワード：利得一定制御 光増幅器 マルチコア

1. 研究開始当初の背景

現在の大容量光通信ネットワークを支えている光ファイバ伝送システムは、伝送容量に関して物理的限界に近づきつつある。そこで、マルチコアやマルチモード技術といった新規空間分割多重技術の研究が進められている[1, 2]。マルチコア光ファイバは1本のファイバの中に複数のコアを有し、コア数倍の伝送容量の増大を可能にする。マルチコア伝送システムの主要構成要素に、マルチコアエルビウム添加ファイバ増幅器 (MC-EDFA) がある。MC-EDFA の励起方式として、1つの励起光源により複数のコアを励起する励起光源共有方式が、消費電力及び部品点数の削減の観点から有望である[3, 4]。しかし、励起光源共有型 MC-EDFA では、コア毎に独立して励起光パワーを制御する事が出来ないため、従来型の励起光 FF/FB 制御が適用できない。将来のマルチコア伝送システムにおいても、MC-EDFA の利得一定制御 (AGC) が必須となる。これまでに、励起光源共有型 MC-EDFA に適用可能な世界初の AGC 方式として、全光型 FF-AGC 方式を提案し、その原理確認と初期検討結果を報告してきた。[5, 6]。本方式では、従来の電氣的な FB/FF 制御方式と異なり、高速・大電流のデジタル制御回路が不要である。従って、全光型 FF-AGC 方式は、消費電力、空間利用効率などの観点で、従来方式に比べ、顕著な優位性が見込まれる。現在、この全光型 FF-AGC 回路の高速・高精度化を実現する光共振器構成及びその性能明確化に関する検討は喫緊の課題である。

2. 研究の目的

我々が提案する全光型 FF-AGC 回路は、光共振器及び利得媒質を有する制御光発生回路により構成される。AGC 回路では、信号光と逆の変化をする制御光を発生し、MC-EDFA の各コアへの入力光パワーを一定に保つことで、AGC 動作を実現する。本方式では、光回路パラメータを適切に設定することで、電気段処理なしに自律的 (アクティブな制御なし) に AGC 動作を行う。本研究では、全光型 FF-AGC 回路の高速・高精度化の実現のため、AGC 回路に用いる光共振器構成の最適構成及び性能を明らかにし、その回路設計技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、我々の提案する全光型 FF-AGC 回路の高速・高精度化を実現するため、回路構成及びその性能明確化に関する検討を行う。まず、従来検討の信号光波長帯域である C 帯より長波長側である L 帯帯域において動作可能な AGC 回路構成の検討および動作特性の評価を行う。次に、高速動作が可能な SOA を用いた AGC 回路について、課題であった SOA の偏波依存利得による性能低下を抑制できる光共振器構成を提案し、その動作特性を実験評価した。さらに、回路の設計・解析に活用するため、全光型 FF-AGC 方式のモデリングを行い、AGC 回路のシミュレータを構築する。

4. 研究成果

以下に本研究で得られた主な成果について記載する。

(1) L 帯用の全光型 FF-AGC 回路の検討

① 実験構成

実験構成を図 1 に示す。EDFA ゲインブロック (GB) の前段に、ファイバリングレーザ (FRL) から構成される AGC 回路を設置する。FRL の利得媒質には EDF を用いる。L 帯動作のため、アイソレータを間に設置した 2 つの EDF を双方向励起した。制御光波長は FRL 内の光バンドパスフィルタ (OBPF) により決定され、帯域短波長側の 1570.4nm とした。信号光は残留光と 4 波長の飽和光からなる。波長は残留光を 1585.0nm、飽和光を 1575.4、1581.2、1589.6、1600.6nm とした。AGC 回路入力において、残留光のパワーを -30dBm に固定し、飽和光のパワーを可変光アッテネータ (VOA<sub>sat</sub>) により変化させた。

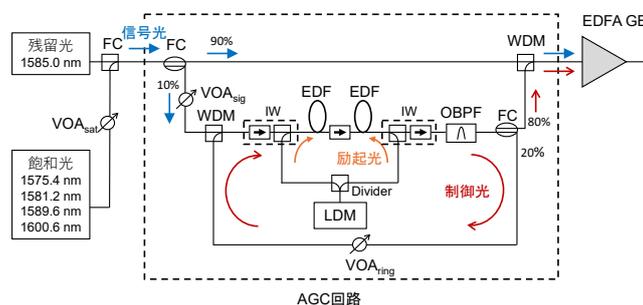


図 1 L 帯用全光型 FF-AGC 方式の実験構成

AGC 回路入力において、残留光のパワーを -30dBm に固定し、飽和光のパワーを可変光アッテネータ (VOA<sub>sat</sub>) により変化させた。

② 利得制御特性

AGC の有無における、GB の利得制御特性を図 2(a), (b) に示す。最大信号入力時の利得を基

準とした利得偏差 ( $\Delta G$ ) について、それぞれ 2 回の測定結果をプロットしている。図 2(a)より、AGC を用いた場合の  $\Delta G$  の絶対値の最大値 ( $\Delta G_{\max}$ ) は  $\sim 0.1\text{dB}$  であった。一方、AGC を用いない場合、図 2(b)に示すように、 $\Delta G_{\max}$  は  $11.0\text{dB}$  であった。これらの結果から、全光型 FF-AGC 方式を用いることにより、利得偏差を大きく低減できることが確認された。

### ③ 信号光配置特性

波長分割多重 (WDM) 信号光の波長配置依存性について実験検討を行った。図 1 の実験構成において、信号光には 4 波長 (1575.4, 1581.2, 1589.6, 1600.6nm) のみを用いた。AGC 回路入力における信号光パワーは 4 波長入力時に  $0.40\text{mW}$  とした。これは  $-20\text{dBm/ch}$  の場合、40ch の WDM 信号に相当する。EDFA の利得スペクトルは、L 帯において平坦とした。この実験では、制御光の波長は  $1570.8\text{nm}$  とした。信号光を 4 波とした場合と、いずれかの 1 波を遮断し、3 波とした場合について利得スペクトルを測定し、信号光波長配置依存性を評価した。これは 40ch から 30ch への WDM チャンネル数の変化に相当する。

AGC を用いない場合の利得および利得偏差スペクトルを図 3(a)、(b)に示す。3 回の測定の平均値をプロットしている。また、利得偏差についてはエラーバーにて、最大・最小値も示している。利得偏差は  $0.7\sim 1.7\text{dB}$  を示しており、短波長側で大きいことがわかった。各カーブの差が信号光波長配置依存性に対応し、利得飽和特性の波長依存性に起因すると考えられる。次に、AGC を用いた場合の特性について図 3(c)、(d)に示す。AGC を用いることで利得の変化が抑えられている。利得偏差は、全ての波長において概ね  $0.1\text{dB}$  程度以下となっており、波長配置依存性も小さく、良好な制御特性が確認された。

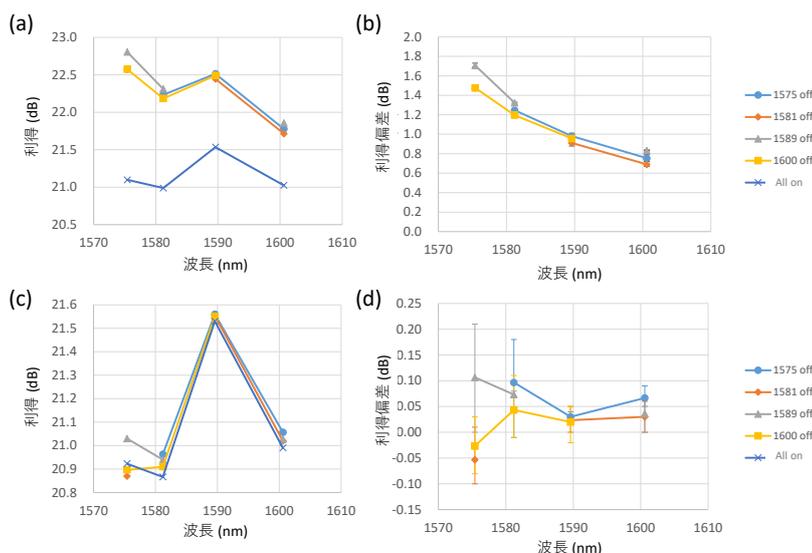


図 3 信号光配置依存性。AGC なしの場合の(a)利得、(b)利得偏差スペクトル。AGC ありの場合の(a)利得、(b)利得偏差スペクトル。

## (2) 信号光偏波無依存構成の検討

### ① 基本構成

本研究で提案したサーキュレータとファラデー回転子ミラー (FRM) を用いた新規ダブルパス構成の基本構成を図 4 に示す。図には AGC 回路内の FRL 部分のみを示している。リングを周回する信号光および制御光はサーキュレータにより、SOA および FRM を通過する。2 つの光は FRM により  $90$  度の偏波回転を受け、再び SOA を通過する。SOA 内を直交する 2 偏波で通過することで、SOA の偏波依存性の影響を抑制することができる。

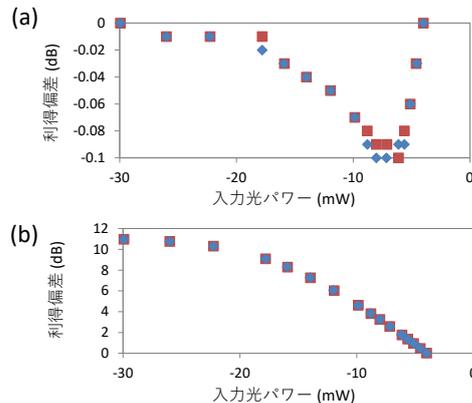


図 2 利得制御特性。(a)AGC あり、(b)AGC なし。

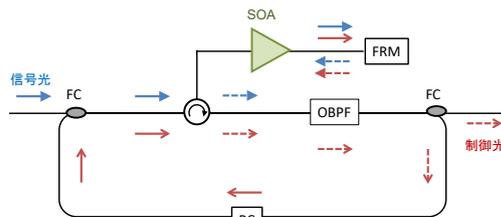


図 4 信号光偏波無依存化の基本構成

## ② 実験構成

実験構成の全体図を図 5(a)に示す。信号光は残留光および飽和光からなり、それぞれの波長を 1552.5nm および 1547.9nm とした。AGC 回路入力における残留光パワーは -20dBm 固定とした。飽和光のパワーおよび偏波は VOA (VOA<sub>sin</sub>) および偏波コントローラ (PC<sub>sin</sub>) により変化させた。AGC 回路から出力された信号光および制御光は EDFA GB へ入力した。GB 出力から OBPF により残留光のみを取り出し、光パワーメータで測定した。

AGC 回路の実験構成を図 5(b)に示す。制御光波長は OBPF の中心波長で決定され、実験では C 帯長波長端である 1560.6nm とした。実験に用いた SOA の偏波依存利得は ~0.9dB であった。比較のために FRM の代わりにミラー (M) を用いた構成についても測定した。

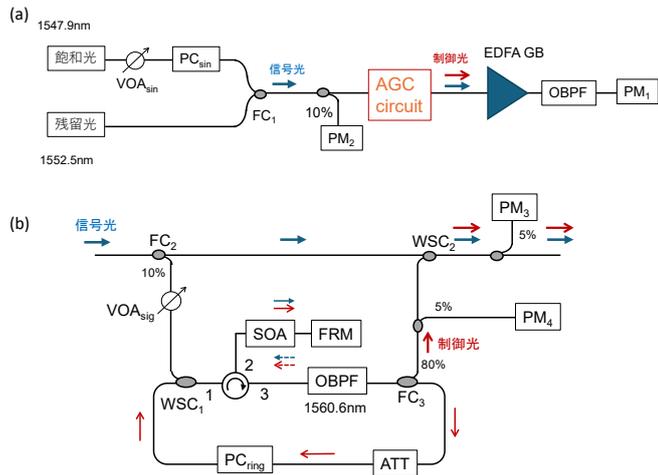


図 5 信号光偏波無依存化の実験構成。  
(a)全体構成、(b)AGC 回路構成。

## ③ AGC 回路の入出力特性

FRM 構成および M 構成における、AGC 回路出力光 (信号光、制御光、合計光) の入力信号光パワー依存性を図 6(a), (b)に示す。飽和光の偏波を変化させ、制御光パワー ( $P_c$ ) が最大、最小とした場合について測定した。 $P_c$  の最大値、最小値をそれぞれ  $P_{c,max}$ ,  $P_{c,min}$  とし、合計光 ( $P_t$ ) の最大値、最小値をそれぞれ  $P_{t,max}$ ,  $P_{t,min}$  とする。 $P_{t,min}$  のときに、 $P_{sin}$  の最小値と最大値における GB の利得が一致するように、AGC 回路の条件 (VOA<sub>sig</sub>) を調整した。その結果、 $P_{sin}$  の変化に対し、 $P_{t,min}$  はほぼ一定に保たれていることがわかる。一方、偏波依存性により、 $P_{t,max}$  は一定からずれている。FRM 構成では M 構成に比べ、 $P_c$  および  $P_t$  の最大値と最小値の差が小さい。よって、FRM 構成にすることにより、SOA の信号光偏波依存性が抑制されていることがわかる。制御光の減少量 ( $\Delta P_d$ ) を、入力信号光パワー最小時の制御光からの減少量で定義する。制御光減少量の最大値 ( $\Delta P_{d,max}$ ) および最小値 ( $\Delta P_{d,min}$ ) は、それぞれ  $P_{c,min}$  および  $P_{c,max}$  に対応する。制御光減少量の偏波依存性を次式で定義する。

$$\Delta P_d = 10 \log_{10} (P_{d,max} / P_{d,min}) \quad (1)$$

図 7(a)に  $\Delta P_d$  の入力信号光パワー依存性を示す。 $\Delta P_d$  は入力信号光パワーに対し、概ね一定値となることがわかった。 $\Delta P_d$  の平均値は、FRM 構成および M 構成において、それぞれ ~0.21dB および ~1.00dB であった。

次に、合計光の偏波依存性を  $\Delta P_t$  とし、次式で定義する。

$$\Delta P_t = 10 \log_{10} (P_{t,max} / P_{t,min}) \quad (2)$$

図 7(b)に  $\Delta P_t$  の入力信号光パワー依存性を示す。 $\Delta P_t$  は入力信号光パワーとともに増加している。 $\Delta P_t$  の最大値は、FRM 構成および M 構成において、それぞれ ~0.11dB および ~0.49dB であり、FRM 構成により約 1/4 に低減された。

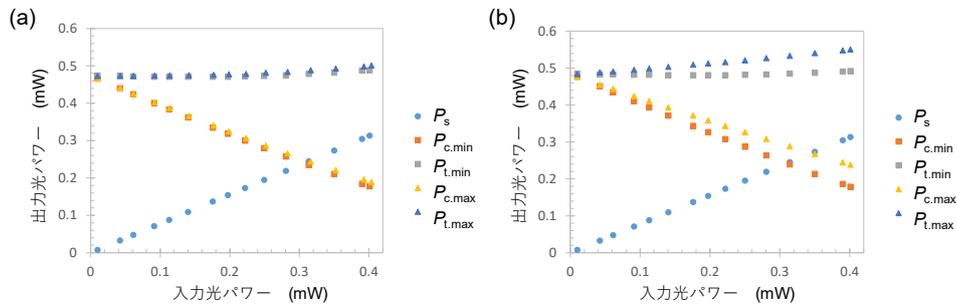


図 6 AGC 回路の入出力特性。(a)FRM 構成、(b)M 構成。

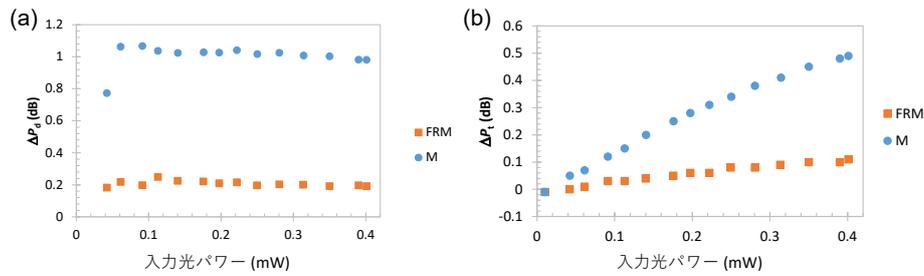


図 7 (a)制御光減少量および(b)合計光の信号光偏波依存性。

#### ④ 利得制御特性

飽和光の偏波を変化させた際の、GB の利得の最大値 ( $G_{\max}$ )、最小値 ( $G_{\min}$ ) を測定した。FRM 構成および M 構成における、利得の入力信号光パワー依存性を図 8(a), (b)に示す。 $G_{\max}$  は  $P_{\sin}$  の変化に対して、ほぼ一定を保っている。一方、 $G_{\min}$  は入力信号光パワーの増加とともに減少している。FRM 構成では、M 構成に比べ利得の変動が小さいことがわかった。利得の偏波依存性を次式で定義する。

$$\Delta G = 10 \log_{10} (G_{\max} / G_{\min}) \quad (3)$$

$\Delta G$  の入力信号光パワー依存性を図 9 示す。 $\Delta G$  の最大値は、FRM 構成および M 構成の場合で、それぞれ  $\sim 0.12\text{dB}$  および  $\sim 0.45\text{dB}$  であった。よって、FRM 構成により約 1/4 に低減されており、本提案構成の有効性を確認した。

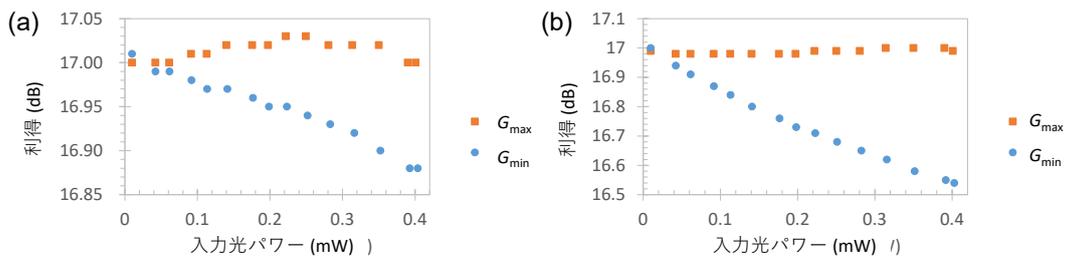


図 8 利得の入力信号光パワー依存性。(a)FRM 構成、(b)M 構成。

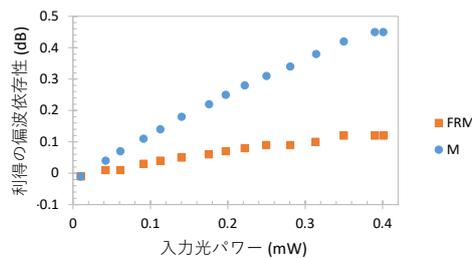


図 9 利得の偏波依存性。

#### <参考文献>

- [1] T. Morioka, OFC, Th1C.3 (2017).
- [2] 中沢, 他, 「光通信技術の飛躍的高度化」, オプトロニクス (2012).
- [3] K. S. Abedin, et al., Opt. Express, **20**, 20191 (2012).
- [4] B. J. Puttman, et al., OFC 2019, Th4B.1, (2019).
- [5] K. Kitamura, et al., IEICE Electron. Express, **13**, 20160920 (2016).
- [6] K. Kitamura, et al., IEICE Electron. Express, **16**, 20190001 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中 邦浩, 増田 浩次, 原田 瑠河, イメディオラム パルチクル アプリ, 北村 心
2. 発表標題 導波自然放出光回路方式の設計技術
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 増田 浩次, 田中 邦浩, 原田 瑠河, イメディオラム パルチクル アプリ, 北村 心
2. 発表標題 導波自然放出光回路方式の性能最適化
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 北村心
2. 発表標題 全光型フィードフォワード利得一定制御方式におけるサーキュレータとファラデー回転子ミラーを用いた信号光偏波無依存構成の利得制御特性
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（第1回）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北村心
2. 発表標題 L帯マルチコアEDFAのための全光型利得一定制御方式における信号光配置依存性
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北村心
2. 発表標題 全光型フィードフォワード利得一定制御方式におけるサーキュレータとファラデー回転子ミラーを用いた信号光偏波無依存化の検討
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 121.北村心, 増田浩次
2. 発表標題 L帯マルチコアEDFAの全光型フィードフォワードAGCにおける利得制御特性
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

島根大学、総合理工学部、機械・電気電子工学科、フォトニクス研究室ホームページ <a href="http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~masuda/">http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~masuda/</a>
---

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
研究分担者	増田 浩次  (MASUDA Hiroji)  (60583127)	島根大学・学術研究院理工学系・教授    (15201)	

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
---------	---------