

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月25日現在

機関番号：15201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860038

研究課題名（和文） 光ネットワークにおける光増幅器の自立型動的制御技術

研究課題名（英文） A study on independent dynamic control technique of optical amplifiers in optical networks

研究代表者

増田 浩次 (MASUDA HIROJI)

島根大学・総合理工学部・教授

研究者番号：60583127

研究成果の概要（和文）： フォトニックネットワークにおける光増幅器の自立型動的利得制御法を用いた利得検出光回路構成法の検討を行った。検討した光増幅器は、大容量のフォトニックネットワークで重要なエルビウム添加光ファイバ増幅器（EDFA）（特に L 帯の EDFA）と半導体光増幅器（SOA）である。それらの光増幅器からの自然放出光受光に基づく利得検出法の原理確認と利得検出精度の明確化の検討を行った。その結果、L 帯 EDFA と SOA における基本動作確認に成功し、EDFA における利得検出精度特性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）： We have studied configurations of the optical circuits for gain detection of optical amplifiers used in photonic networks, which circuits use an independent operation type of gain control scheme. The optical amplifiers used are erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs), especially, the L-band EDFAs, which are indispensable for large-capacity photonic networks, and semiconductor optical amplifiers (SOAs). We have confirmed the basic operation characteristics of the scheme which detects signal gain by measuring spontaneous emission light powers from optical amplifiers, which are the L-band EDFAs and SOAs. We have also clarified the accuracy of the detected gains for EDFAs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,170,000	351,000	1,521,000
2011年度	1,150,000	345,000	1,495,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,320,000	696,000	3,016,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：光通信、光増幅器、フォトニックネットワーク

1. 研究開始当初の背景

近年の通信トラフィックは指数関数的な伸びを続けており、基幹系通信網の例では、光ファイバ1本あたりの伝送容量は、過去20年間で1000倍となっており、今後もこの傾向は当分続くと推測される。光ファイバ通信

システムにおける光増幅器としては、1.5 μ m帯で動作するエルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA）が世界的に普及している。従来技術の動的利得制御法（AGC）は、外部からのプローブ光（信号光自体の場合もある）を用いた利得検出に基づく“従属型”のAGCであ

った。一方、EDFA のエルビウム添加ファイバ (EDF) のファイバ動径方向に放射される自然放出光 (SE 光) をフォトダイオードで受光して利得を検出する新規な“自立型”の AGC 法が提案されている。

これまでの自立型動的利得制御法の検討では、C 帯 (1550nm 帯) で動作する EDFA における原理確認実験が報告されている。ところが、EDFA の動作波長帯としては、L 帯 (1580nm 帯) も重要な波長帯である。また、半導体光増幅器 (SOA) は、小型で集積性が高いといった特長から、送受信器内の単一波長用光増幅器や、アクセス系への適用などが期待されている。したがって、L 帯の EDFA 及び SOA における自立型 AGC 法の検討は意義深い。

2. 研究の目的

本研究の目的は、光信号の波長とパワーがダイナミックに変化する将来のフォトニック NW において、外部からの制御用のプローブ光を用いない、光増幅器の自立型の動的利得制御について、その提案と原理確認、及び定量的な性能評価を実験的に行うことである。

3. 研究の方法

利得検出過程に関する理論モデル構築と定式化及び数値計算を行い、具体的な実験系の設計を行う。L 帯 EDFA に関する実験では、同じ種類の EDF を用いて、参照 EDFA として、C 帯 EDFA を構築して比較検討する。L 帯 EDFA が、C 帯 EDFA と同程度の良好な利得制御の精度を有するか否かを確認する。具体的には、利得を G 、自然放出光パワーを P_{SE} としたとき、 A 、 B を定数として、

$$G = AP_{SE} + B \quad (1)$$

の関係が近似的に成立することを確認する。

SOA に関しては、半導体光増幅器の信号光の導波路中での散乱や界面反射による過剰雑音光の有無と、利得検出精度に与える影響の明確化を検討する。

4. 研究成果

本研究における検討結果について、以下に、理論検討、実験検討の順で示す。

(1) 理論検討結果

EDFA の SE 光受光による利得検出法における利得 G (dB 単位) と自然放出光パワー P_{SE} は、図 1 に示した SE 光受光の光回路の実装精度が理想的であれば、式 (1) に示す 1 次関数関係を示すことが予想される。EDF からファイバ動径方向に放射した SE 光を大口径のフォトダイオード (PD) で受光することにより利得検出を行っている。ただし、その SE 光は、EDF 長手方向に配置した複数 (n 個)

のサンプリングポイントから受光している。従来検討報告としては、以下に示す参考文献 [1] 及び [2] に、C 帯 EDFA に関する実験結果が示されている。参考文献 [1] : 相田 他, 信学論 B-1, Vol. J75-B-1, pp. 298-303, 1992、参考文献 [2] : H. Masuda et al., PTL, Vol. 5, pp. 1017-1019, 1993。しかしながら、光回路の実装精度に関する理論検討及び L 帯 EDFA に関する実験検討の報告はない。

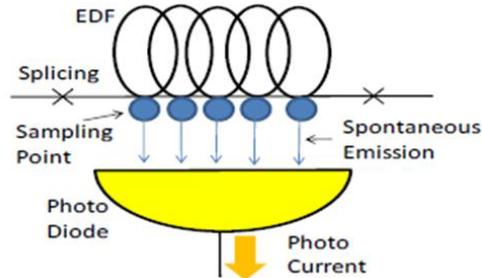


図 1 利得検出光回路の構成

図 2 は、C 帯及び L 帯 EDFA における利得誤差 (ΔG) のサンプリングポイント数 n 依存性を、典型的な励起光パワー (P_p) である 100 mW の場合について示している (5. 主な発表論文等に記載の文献①)。この結果から、C 帯及び L 帯 EDFA とともに、 n が 6 以上で $\Delta G = 0.04$ dB 以下という十分高い利得検出精度が得られることが分かった。また、C 帯 EDFA と L 帯 EDFA の比較において、上位準位占有比率のファイバ距離依存性 ($N_2(z)$) が両者で大きく異なり、L 帯 EDFA における $N_2(z)$ の z 依存性が大きいことから L 帯 EDFA の方が ΔG が大きいことが明らかになった。

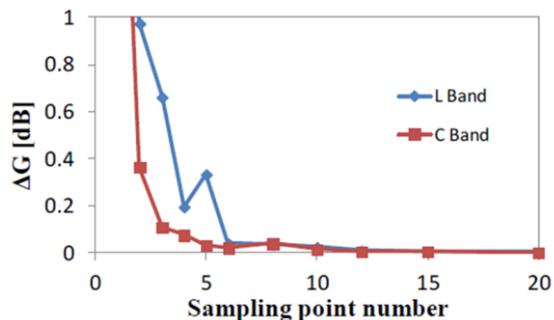


図 2 利得誤差のサンプリングポイント数依存性

次に、利得誤差 ΔG のサンプリングポイント位置ずれ依存性を調べた (文献⑥)。図 3 にその位置ずれ (Δz) の様子を示す。C 帯 EDFA に対し、EDF 長を 3.9m、信号光波長 1550nm における波長多重信号に対する平坦スペクトル利得を 25dB とした。図は、 Δz が EDF 長の $\pm 1\%$ (± 3.9 cm) の時の様子を示している。

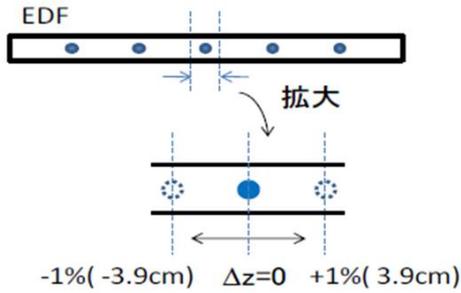


図3 サンプルングポイント位置ずれの模式図

利得誤差 ΔG の位置ずれ Δz 依存性のシミュレーション結果を図4に示す。この結果から、 Δz の絶対値を0.5% (1.95cm)とすれば、利得誤差が0.03dBの良好な値となることが確認できた。この程度のサンプルングポイントの実装は十分可能な範囲と考えられる。また、上記の結果はC帯EDFAに関するものであるが、L帯EDFAについても同様な特性であると推定される。

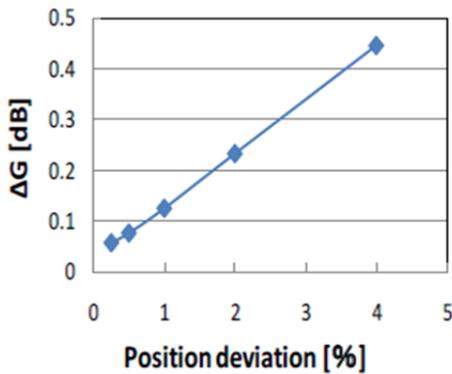


図4 利得誤差の位置ずれ依存性

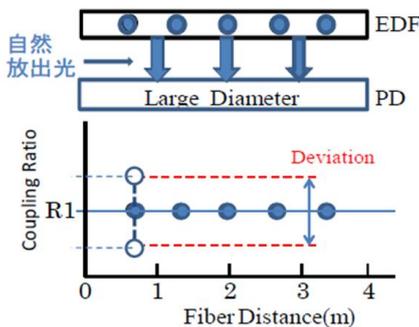


図5 結合比率ずれの模式図

さらに、利得誤差 ΔG のSE光結合比率(R)依存性を調べた(文献③)。Rは、EDFの各サンプルングポイントからフォトダイオードPDへの結合比率であり、式(1)に対する理想状態では、Rがサンプルングポイント位置に

無依存で一定である。しかしながら、ある程度の実装上の誤差が想定される。図5は、その結合比率Rのずれ(ΔR)依存性を模式的に示している。

ここでは、結合比率Rのずれの典型例として、第1のサンプルングポイントのR(R_1)が設計値からずれた場合の利得誤差を計算している。典型的なC帯EDFAの動作条件に対する計算結果を図6に示す。ただし、 R_1 が設計値どおりの場合を100%として、利得誤差 ΔG の結合比率 ΔR 依存性を計算した。図より、 ΔR が5%以内であれば ΔG が0.03dB以下という良好な結果を得た。この程度のサンプルングポイントの実装は十分可能な範囲と考えられる。また、上記の結果はC帯EDFAに関するものであるが、L帯EDFAについても同様な特性であると推定される。

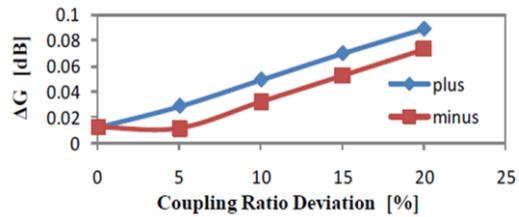


図6 利得誤差の結合比率ずれ依存性

以上の理論検討結果から、サンプルングポイント数を6以上とすることにより、SE光受光回路の実装誤差に関して、想定される程度の値であれば、十分高い利得検出精度が得られることが分かった。ただし、実装誤差としては、サンプルングポイント位置のずれと結合比率のずれを考慮した。

また、理論検討において、本提案の利得検出技術を活用した雑音指数測定法の検討を行った(文献②、④、⑦、⑨)。その結果、利得検出の場合と同様に、類似のSE光受光回路を用いて自立型の雑音指数測定が可能であり、十分な測定精度が得られることが明らかになった。

(2) 実験検討結果

まず、L帯EDFAにおけるSE光受光型の利得検出原理確認実験を行った。C帯EDFA動作の評価が同時に可能となるEDF長を選択した。1.53 μm 近傍の吸収ピークにおける吸収係数 α が21dB/mのEDFで、長さ $L=6.0\text{m}$ のEDFを用いた。励起光の波長を1455nmとした。したがって、吸収係数 α とEDF長 L の積は86dBである。また、信号光波長は、C帯EDFA動作の評価では1550nm、L帯EDFA動作の評価では1570nmとした。励起LDモジュールの駆動電流を I_d 、EDFA入力の信号光パワーを P_{sin} とする。 I_d の典型値として85, 100, 150mAとし、それらの I_d に対して、 P_{sin} を-20dBm~

6dBm の範囲で 2dB 刻みで変化させ、そのときの SE 光受光パワー P_{SE} と利得 G を測定した。EDF のサンプリングポイント数を、(1)の理論検討結果を踏まえて十分大きな値である 8 とした。また、EDF のサンプリングポイントと大口径フォトダイオード PD の間に、励起光波長 1455nm におけるレイリー散乱雑音光除去のための誘電体多層膜型の光フィルタを設置した。

C 帯の波長 1550nm の信号光に対する測定結果を図 7 に示す。式(1)の 1 次関数形状が、各々の駆動電流値 I_d に対して確認された。ただし、それらの 3 つの駆動電流値 I_d に対する 1 次関数形状が互いに若干ずれが観測された。これは、参考文献[1]及び[2]のずれ(本方法における利得検出誤差に対応するもの)に比べ、数倍以上大きいものである。

同様に、L 帯の波長 1570nm の信号光に対する測定結果を図 8 に示す。C 帯の場合と同様に、式(1)の 1 次関数形状が、各々の駆動電流値 I_d に対して確認された。これは、L 帯 EDFA に関する初めての実験検証結果であり、重要な実験結果であると考えられる。

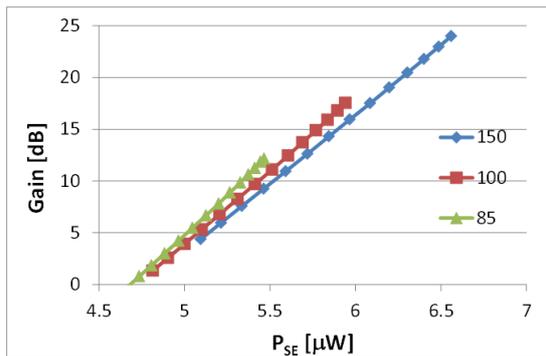


図 7 利得の SE 光パワー依存性 (C 帯)

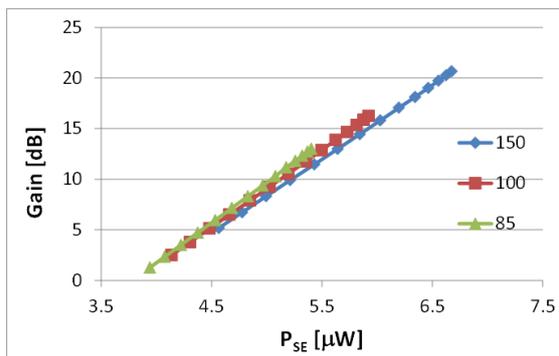


図 8 利得の SE 光パワー依存性 (L 帯)

次に、図 7 及び 8 で観測された 1 次関数形状(式(1))からの大きなずれの原因を解明すべく、短めの EDF を用いた実験を行った。用いた EDF の吸収係数 α は約 6dB/m、EDF の長

さは約 4m であった。したがって、吸収係数 α と EDF 長 L の積は 24dB である。

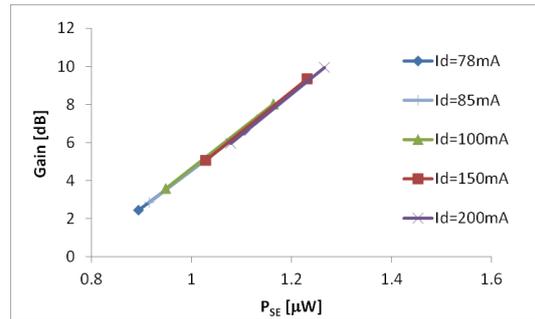


図 9 利得の SE 光パワー依存性 (C 帯)

この短尺 EDF に対する利得対 SE 光パワーの測定結果を図 9 に示す。この測定では、入力信号光パワー P_{sin} を -20dBm 及び 0dBm、励起 LD モジュール駆動電流 I_d を 78, 85, 100, 150, 200mA とした。図より、参考文献[1]及び[2]と同様の良好な 1 次関数形状が確認できる。

以上の結果から、今後の課題として、さらに他の長さの EDF を用いた実験を行うなどして、図 7 及び 8 に示した 1 次関数形状のずれの原因を明確にすることを挙げることができる。

さらに、半導体光増幅器 SOA における SE 光受光型利得検出実験を行った。SOA モジュールを負荷抵抗 (5 Ω) を用いて電流駆動した。また、SOA モジュール側面からの光パワーを大口径 PD を用いて測定した。SOA モジュールの利得ピーク波長域は C 帯であり、1550nm の信号光に対する利得を測定した。この時の SOA モジュールと負荷抵抗に加えた電圧を V とする。

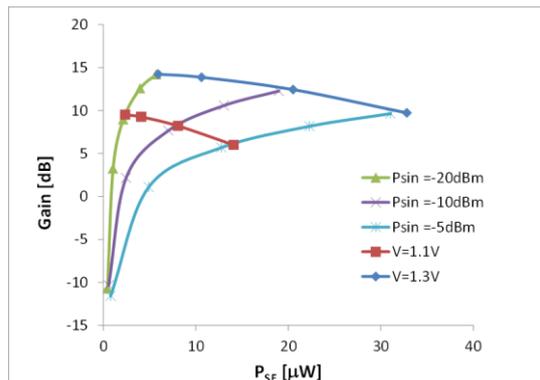


図 10 利得の SE 光パワー依存性 (SOA)

今回、利得対 SE 光パワーの測定に初めて成功した。測定結果を図 10 に示す。電圧 V は、1.1V 及び 1.3V、また、入力信号光パワー P_{sin} は、-20, -10, -5dBm とした。図より、EDFA の場合と大きく異なる形状の測定点を得られ、明らかに、式(1)の 1 次関数関係が

成り立っていないことがわかった。この原因の1つとして考えられることは、半導体導波路中の散乱光強度がEDF中のそれに比べはるかに大きいことである。以上の実験結果から、SOAにおける利得と側方向受光パワーの関係は、EDFAにおける関係と大きく異なることが分かった。本提案方式である側方向受光パワー測定に基づく利得検出が可能か否かは、今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 10 件)

- ① 信川友宏, 三本松和男, 長岡大樹, 松永怜磨, 増田浩次, 「L帯EDFAの自然放出光受光型利得検出における光回路構成法」, 電子情報通信学会総合大会, B-10-68, p. 391, 2012年3月22日, (岡山市) 岡山大学
- ② 三本松和男, 信川友宏, 増田浩次, 「L帯EDFAの自然放出光受光型雑音指数モニタ法における光回路構成法の検討」, 電子情報通信学会総合大会, B-10-67, p. 390, 2012年3月22日, (岡山市) 岡山大学
- ③ 信川友宏, 三本松和男, 増田浩次, 「C帯EDFAの自然放出光受光型利得検出法における測定精度の結合比率依存性」, 電気・情報関連学会連合大会, p. 324, 2011年10月22日, (広島市) 広島工業大学
- ④ 三本松和男, 信川友宏, 増田浩次, 「EDFAの自然放出光受光型雑音指数モニタリングにおける測定精度の結合比率依存性」, 電気・情報関連学会連合大会, p. 322, 2011年10月22日, (広島市) 広島工業大学
- ⑤ 松永怜磨, 長岡大樹, 増田浩次, 「エルビウム添加ファイバ増幅器における過渡応答特性の励起光波長依存性」, 電気・情報関連学会連合大会, p. 261, 2011年10月22日, (広島市) 広島工業大学
- ⑥ 松永怜磨, 村上真隆, 増田浩次, 「EDFAの自立型利得制御法における利得検出精度特性」, 電子情報通信学会総合大会, B-10-103, p. 412, 2011年3月17日, (東京都) 東京都市大学
- ⑦ 村上真隆, 松永怜磨, 増田浩次, 「自然放出光受光に基づくEDFAの雑音指数測定法における測定精度特性」, 電子情報通信学会総合大会, B-10-104, p. 413, 2011年3月17日, (東京都) 東京都市大学
- ⑧ 松永怜磨, 村上真隆, 増田浩次, 「EDFAの自然放出光受光に基づく自立型利得制御法における利得検出精度特性」, IEEE HISS (広島支部学生シンポジウム), C-22, 2010年11月16日, (松江市) 島根大学
- ⑨ 村上真隆, 松永怜磨, 増田浩次, 「EDFA自然放出光受光に基づく雑音指数検出法の精度に関する検討」, IEEE HISS (広島支部

学生シンポジウム), C-28, 2010年11月16日, (松江市) 島根大学

- ⑩ 長岡大樹, 田山恵一, 増田浩次, 「短波長励起L帯エルビウム添加光ファイバ増幅器の増幅特性」, IEEE HISS (広島支部学生シンポジウム), C-26, 2010年11月16日, (松江市) 島根大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 浩次 (MASUDA HIROJI)
島根大学・総合理工学部・教授
研究者番号: 60583127

(2) 研究分担者: 無し

(3) 連携研究者: 無し