

	たかの かつみ
氏 名	高野 勝美
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成19年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	光増幅器の動的応答と制御に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 伊藤 弘昌
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 伊藤 弘昌 東北大学教授 中沢 正隆 東北大学教授 山田 博仁

## 論 文 内 容 要 旨

光ファイバの低損失化によって光ファイバ通信が飛躍したように、光ファイバ増幅器の実用化によって光損失は克服され、近年の光ファイバ通信はますます発展を遂げてきた。光ファイバ通信システムを安定に動作させるためには、光信号強度を安定化することが重要な技術である。光ファイバ増幅器の動的な応答に起因する出力変動を抑制する利得制御は、符号誤りやパケット損失を減少させるための重要な課題である。光ファイバ増幅器の利得は、励起光のみならず入力光の強度に依存する。このことに着目し、本論文は、増幅媒体に入力する光を巧みに利用する光ファイバ増幅器の利得制御方式を提案し、その特性を理論および実験の両面から明らかにした。本論文は全文5章よりなり、以下はその概要である。

第1章は序論であり、本研究の意義および目的について述べた。光ファイバ増幅器は、その蛍光寿命よりも高速に変化する信号強度には反転分布は追従せずに、信号入力光強度の平均値によって増幅器の動作点が決まり、ひずみのない増幅が可能である。しかし、蛍光寿命よりも長い持続時間を有する光強度間の急激なレベル遷移が信号入力強度にある場合には、光ファイバ増幅器の利得はゆっくりとその変化に追従することとなり、増幅器出力波形はひずんだものになる。このような光ファイバ増幅器の動的な利得変化は、波長多重伝送における波長チャンネルの分岐挿入機能の高機能化、および光信号のパケット化といった将来のネットワーク機能に対して問題となる。通信伝送路における光ファイバ増幅器は、波長チャンネルの分岐挿入もしくは光パケットの入力に対する波形ひずみだけでな

く、隣接波長チャンネルへのクロストークが重要な課題である。光パケットスイッチングネットワークノードにおける損失補償用光ファイバ増幅器としては、光ファイバループバッファ内の光ファイバ増幅器における緩和振動の問題が重要である。光ファイバ増幅器の利得を決めるものは、(1) 増幅媒体の吸収量や蛍光量を決める物理的な変数、(2) 励起光、(3) 入力光である。第一の要因は、光ファイバ増幅器を製造する上では重要であるが、運用中の利得制御には使うことができない。二つ目の要因である励起光は、本来反転分布を生成するためのものであり、これを制御すると利得のみならず雑音指数や利得波長特性に影響を与えることになる。そこで三つ目の要因である光増幅器入力光に着目した。先に述べた信号光強度の変化に伴うこれらの問題に対処する方法として、光ファイバ増幅器に入力される光を巧みに利用する方法を本論文中で取り扱うことを述べ、それによって光ファイバ増幅器の動的応答に伴う出力変動を抑制することを本論文の目的とすることを述べた。

第2章は「光ファイバ増幅器の動作点変化による出力変動」と題し、光ファイバ増幅器の光増幅原理と、入力強度変化に対する光ファイバ増幅器の動的な応答について述べ、光ファイバ増幅器の利得変化がもたらす問題点を明らかにした。まず、光ファイバ増幅器の出力変動を定量的に扱うための理論的なモデルについて述べ、レート方程式と光ファイバ伝搬方程式を連立した理論モデルを構築した。次に増幅器に入力される光強度をステップ関数として、入力光強度の変化に対する増幅器動作点の動的な応答について理論解析を行い、その結果から得られる応答波形の特徴について論じ、利得変化の時定数について述べた。応答波形には尖塔的な出力が表れること示し、そのピーク強度は、入力強度変化前の高利得と、強度遷移後の出力定常値とにより決まることを理論解析により示した。入力光強度変化に対する光ファイバ増幅器の応答時定数は、励起強度および入力強度が大きいほど速まる特性であることが確認できた。典型的な光ファイバ増幅器の動作状態を想定した解析結果によると、時定数は数 $\mu\text{s}$  から数 100  $\mu\text{s}$  の範囲であることが明らかになった。第2章で論じた入力光強度の変化に対する応答の知見は、光ファイバ増幅器の動的応答に起因する出力変動を抑制するために第3章および第4章で提案する方式の基礎的な知見となっている。

第3章は「入力補償光制御方式による光ファイバ増幅器利得制御」と題し、通信伝送経

路上の光ファイバ増幅器の利得安定化方式について、信号光入力強度の変化に対して、それを補償するように内蔵する信号波長帯の別光源強度を制御し利得を一定化する入力補償光制御方式を提案した。まず、従来方式である励起光制御方式および利得クランプ方式について述べ、それらの特徴と問題点を明らかにした。次に、提案する入力補償光制御方式の動作原理について述べ、それに基づき制御回路を1次低域通過回路モデルで記述した理論モデルを構築した。これを用いた理論的な解析を行い、制御回路の制御利得1000、応答速度1.0us以下において、ステップ応答波形に振動が無く、制御精度5%以下の高精度な制御が行えることを明らかにした。さらに、16チャンネル波長多重伝送システムにおけるチャンネルの分岐挿入実験を行い、理論計算から得られる制御精度とほぼ一致する結果を得ており、本制御により受信感度が5.6dB改善できることを示した。さらに、入力補償光制御方式を導入した光ファイバ増幅器の反転分布について、信号入力光強度変化に対する応答を理論的に解析した。その結果、逆ステップ入力に対する平均反転分布の変化は、非制御下では12.6%であったが、入力補償光制御を用いることによって0.51%の変化に抑えることができることを示した。これらのことから、励起光制御方式や利得クランプ方式で問題であった利得安定化に伴う雑音指数の劣化、および利得波長特性の変動は、入力補償光制御方式では解決できることを示した。

第4章は「光ファイバループ内における光ファイバ増幅器出力変動の抑制」と題し、光ファイバ増幅器を用いた多周回型光ファイバループパケットバッファにおける出力変動とその抑制方法について述べた。光ファイバ増幅器で構成される光ファイバループバッファでは、光帰還ループが構成され、不要な光発振や緩和振動の発生が課題であった。不要な光発振の解消のために、パルス動作光周波数スイーパーとして培われた技術である光ファイバループ中に音響光学周波数シフタを配置する方式を採用した。その構成により、光パケットの遅延実験を行い、10パケット分の遅延に対してパケット劣化のない出力が得られることを実験的に確認した。遅延量をさらに多く確保しようとした場合、光ファイバループ中の光強度に緩和振動が現れることを実験および理論解析による明らかにした。その緩和振動を抑制するために、光ファイバ増幅器に比べてキャリアの緩和時間が $10^7$ 程度短い半導体光増幅器を光ファイバループ中に配置する新しい方法を提案した。光ファイバ増幅器の励起状態を一定とした条件下で比較実験を行い、半導体光増幅器を配置しない場合に存

在した 3 dB の振幅を持つ緩和振動は、提案する方式によって解消することが実証された。これにより、レベル変動の少ない光ファイバループバッファの可能性を示した。提案した光ファイバループバッファは、光増幅器の雑音指数の改善により、100 パケット分の遅延が可能であることを理論的に示した。この結果は、光パケットスイッチングノードに接続される方路数が 64 である場合に、パケット廃棄率を  $10^{-12}$  以下にできることを意味する。光パケット包絡線形状に劣化が少ない本方式は、光ファイバネットワーク上の光識別器や再生中継器の数を減らす効果があり、通信ネットワーク全体をシンプルに構成できる可能性がある。

第 5 章は結論であり、本論文により得られた成果を総括するとともに、光ファイバ増幅器の出力制御に関する今後の課題及び将来の展望について述べた。

# 論文審査結果の要旨

1990年代のエルビウム添加光ファイバ増幅器の実用化により、光増幅技術を用いた高性能で経済的な光通信システムの構築が可能となった。超高速光信号が効率的に伝送される光ファイバ通信のために、波長多重伝送技術では波長チャンネルの分岐挿入のさらなる高機能化および光信号の PACKET 化が求められており、光ファイバ増幅器の動的な応答に起因する出力変動を抑制する利得制御は、ビット誤りや PACKET 損失を減少させるための重要な課題である。光ファイバ増幅器の利得は、励起光のみならず入力光の強度に依存する。このことに着目し、本研究は、増幅媒体に入力する光を巧みに利用する光ファイバ増幅器の利得制御方式を提案し、その特性を理論および実験の両面から明らかにしているもので、全文5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の意義および目的について述べている。

第2章では、光ファイバ増幅器の光増幅原理と、入力強度変化に対する光ファイバ増幅器の動的な応答について述べ、光ファイバ増幅器の利得変化がもたらす問題点を明らかにしている。

第3章では、信号光入力強度の変化に対して、それを補償するように内蔵する信号波長帯の別光源強度を制御して利得を一定化する入力補償光制御方式を提案している。この制御方式についての理論的な解析を行い、制御回路の制御利得 1000、応答速度  $1.0\mu\text{s}$  以下において、ステップ応答波形に振動が無く、制御精度 5% 以下の高精度な制御が行えることを明らかにしている。さらに、16 チャンネル波長多重伝送システムにおけるチャンネルの分岐挿入実験を行い、理論計算から得られる制御精度とほぼ一致する結果を得ており、本制御により受信感度が 5.6dB 改善できることを示している。これらは重要な知見である。

第4章は、光ファイバ増幅器を用いた多周回型光ファイバループ PACKET バッファにおける出力変動とその抑制方法について述べている。光ファイバ増幅器で構成される光ファイバループバッファでは、光帰還ループが構成され、このため長時間の遅延量を得ようとするとう強度に緩和振動を生じやすくなる。この緩和振動を抑制するため、光ファイバ増幅器に比べてキャリアの緩和時間が  $10^{-7}$  程度短い半導体光増幅器を光ファイバループ中に配置する新しい方法を提案している。光ファイバ増幅器の励起状態を一定とした条件下で比較実験を行い、半導体光増幅器を配置しない場合に存在した 3dB の振幅を持つ緩和振動は、提案する方式によって解消することが実証されている。これにより、レベル変動の少ない光ファイバループバッファの可能性を示している。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、光ファイバ増幅器の動的な応答に対して、増幅器へ入力される光強度を帰還制御することによって出力変動を抑制する手法を提案し、実験的検証を通してその可能性を明らかにしたものであり、電子工学および光通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。