HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	空間多重用光増幅器に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	和田, 雅樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第7059号
Issue Date	2018-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/71910
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Masaki_Wada_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　氏名　和田　雅樹

審査担当者　主　査　教　授　齊藤 晋聖
副　査　教　授　宮永 喜一
副　査　教　授　大鐘 武雄

学位論文題名

空間多重用光増幅器に関する研究
（Study on the optical amplifier for space division multiplexing）

従来のシングルモードファイバ (SMF: Single-mode fiber) を用いた伝送システムでは、非線形効果等の影響により一心当たりの伝送容量は 100 Tbit/sec が限界であると予想されている。この限界を打破するために、マルチモードファイバ (MMF: Multi-mode fiber) のコアを伝搬する複数のモード利用するモード多重伝送及びクラッド内に複数のコアを配置したマルチコアファイバ (MCF: Multi-core fiber) を用いたコア多重伝送など空間多重伝送 (SDM: Space division multiplexing) の検討が近年盛んに進められている。これらの伝送路を用いて安定な長距離伝送を実現するためには、光中継器としてエルビウム添加光ファイバ光増幅器 (EDFA: Erbium doped fiber amplifier) や分布ラマン増幅技術 (DRA: Distributed Raman amplification) が重要な技術となる。本論文では、SDM 用光増幅器に着目し実用化を目指して進めてきた研究開発の成果についてまとめている。

第 1 章では、将来の大容量・長距離光通信の実現に向けて、従来の SMF に代わる新たな候補として SDM 用光ファイバが盛んに研究されている背景を述べ、SDM 用ファイバである MCF や MMF などを伝送路とした伝送技術を確立することの必要性を述べている。本論文では、空間多重伝送システムの長延化には不可欠である、光増幅技術を対象に検証を行っており、SDM 用光増幅器における課題を明らかにするとともに、本研究の目的及び構成を述べている。

第 2 章では、MMF を用いたモード多重伝送用の EDFA について述べている。モード多重伝送を行う上で受信時に各モードに強度差があると、伝送特性の劣化が懸念され、これを抑制することは実用化を検討する上で重要な課題となる。そのため、長距離伝送を行う際には光中継器となる EDFA における利得差が伝送特性に大きな影響を与える。本章ではまず初めに EDFA における増幅原理から、モード間利得差 (DMG: Differential mode gain) が発生する要因及び DMG を低減するために増幅器において制御できるパラメータについて示している。2.3 節では PLC の励起光合波器及び励起光のモードの変換に長周期グレーティングを用いる全導波路型の 3 モードに対応した EDFA について述べており、信号光及び励起光の過剰損失が小さい合波技術及び DMG を制御するための構成を提案し、実験的に効果があることを実証している。2.4 節では更なるモード数の拡大に対応するため、増幅特性の異なる 2 種類の EDF を縦続に接続することによる DMG 低減手法を示しており、各 EDF 長の最適化により低 DMG 特性を有する 10 モード EDFA の報告を行っている。2.5 節では増幅器内で信号チャネルをスクランブルし、信号強度を均等化することによって DMG を低減する手法を提案し、実験的に効果があることを実証している。2.6 節では EDFA によるモード多重用 L 帯増幅器に関する検討を行っている。まず、増幅過程について C 帯域との違いを明らかにし L 帯用 3 モード EDFA に関する DMG 低減の手法について明らかにしている。リング形状の屈折率、エルビウム添加分布を有する EDF を用いることで、L 帯域においても低 DMG な特性を有する EDFA が実現できることを実証している。2.7 節では、2.6 節で示した 3 モード L 帯 EDFA のモード数拡張に関する検討を行い、5 モード L 帯 EDFA における DMG 低減に向けた

検証を行っている。5 モード L 帯 EDFA では、DMG だけではなく、伝送路との接続特性も考慮した EDF の設計が必要となることを明らかにし、凹型 EDF の提案及び試作を行っている。増幅特性を実験的に評価し、提案する 5 モード EDFA が低 DMG 特性を有していることを確認している。2.8 節ではモード多重用 EDFA における動的な利得変動の抑制に向けた検討を報告している。増幅可能な全てのモードの利得変動を同時に抑制するため、増幅器に共振器機能を付与した利得クランプ型 EDFA の試作、検証をし、利得クランプ方式を用いることで、増幅される全ての伝搬モードにおいて利得変動が抑制出来ていることを確認している。

第 3 章では、モード多重伝送の信号対雑音比の改善に向けて GI(Graded-Index) ファイバを用いたモード間利得差の小さい DRA 技術について報告を行っている。従来の手法では、DMG 低減のためには、2 種以上の励起モードを伝送路へ入射する必要があったが、GI ファイバ内でのモード群 (LP21 及び LP02 モード) が縮退して伝搬する特性を用いることで、1 種類の励起モードのみで低 DMG の DRA を実現できることを示している。また、試作した伝送路を用いて実験検証を行い、提案する手法によって低 DMG 特性が得られることを実証している。

第 4 章では、更なる空間多重密度の向上に向けた多モード光増幅器のマルチコア化について報告を行っている。近年、高エネルギ効率な SDM 用光増幅器の励起光にハイパワで安価なマルチモード LD を用いる手法が提案されており、EDF のクラッド断面積の低減が励起効率に影響を与えることが知られている。本章ではまず、クラッド断面積の低減に向けたクラッド励起型 2-LP モード 6 コア結合型増幅器の設計を行い、従来報告にある同じ空間チャネル数を有する構造と比較し、クラッド内の励起光密度を改善できることを示している。また、設計した構造を試作および評価し、良好な増幅特性が得られることを確認している。

第 5 章では、結合型マルチコア伝送路のための EDFA について報告を行っている。近年、MIMO(Multiple-input and multiple-output) 伝送における信号処理負荷低減を目的にして結合型 MCF の検討が行われているが、結合型 MCF を用いた長距離伝送の実現には光増幅技術は必須であり、本節ではクラッド励起方式と 12 コアランダム結合型ファイバ構造を採用することで高い励起効率とモード間利得差の低減を同時に実現できる構造を提案している。本章ではまず、EDF に求められる曲げ損失やカットオフ特性から 12 コア EDF の要求条件について明らかにしている。次に設計した EDF の試作、増幅特性の評価を行い、C 帯域において良好な増幅特性を得られていること、及び 1 dB 以下の低モード間利得差を実現できることを確認している。また、12 コア結合伝送路を用いた 1R 伝送実験を行い良好な伝送特性が得られることを確認している。

第 6 章では、本研究で得られた成果を総括している。

これを要するに、筆者は、空間分割多重信号の長距離伝送を実現する上で必要不可欠な光増幅技術について、多モード EDFA、および多モード分布ラマン増幅器におけるモード間利得差の低減技術を提案するとともに、マルチモードマルチコア EDFA における励起光密度の改善技術、結合型マルチコアファイバにおける高励起効率と低モード間利得差の両立方法を提案しており、光ファイバ通信技術に関する学術分野に貢献するところ大なるものがある。

よって筆者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。