

学 位 論 文 題 名

高効率プラセオジム添加フッ化物光ファイバ増幅器の研究

学位論文内容の要旨

近年のコンピュータ通信、インターネットの普及に伴う通信容量の急速な増加は、光ファイバ網を利用した通信容量の大容量化を緊急の課題としている。光ファイバ増幅器は、従来の光-電気変換が介在する光中継器に替わる中継器として、基幹伝送系への適用が検討されているほか、ソリトン通信、波長多重通信システムへの適用など、次世代の大容量・高速光通信システムを構築する上で必要不可欠な光部品として認識されている。

波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯で動作する光ファイバ増幅器として、1991 年に開発されたプラセオジム添加フッ化物光ファイバ増幅器 (PDFA) は、高利得、高出力、低雑音特性に優れ、ラマン増幅器、半導体アンプなどの他の候補に比べ、優れた増幅特性を有している。

しかしながら、従来の ZrF_4 系フッ化物光ファイバを用いた PDFA は、 $1.3 \mu\text{m}$ 発光の量子効率が低いために、高出力の励起光源を必要とし、モジュールの小型化、低価格化の観点から効率の改善が望まれていた。

本論文は、PDFA の効率を改善することを目的とし、従来ホストガラスとして使われている ZrF_4 系フッ化物ガラスよりも、フォノンエネルギーの小さい $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラスを開発し、高効率の光増幅を実現するとともに、高効率 PDFA モジュールを開発したことについて述べたものである。本論文は全 7 章からなり、その主要な成果は次のように要約される。

第 1 章では、本論文の背景と目的が述べられている。光通信システムにおける光ファイバ増幅器の役割、これまでの PDFA 開発の経緯について概説している。すでに実用化されている $1.5 \mu\text{m}$ 帯エルビウム添加光ファイバ増幅器との特性比較から、PDFA においては効率の改善が重要であることを明らかにしている。

第 2 章では、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラス中のプラセオジムの蛍光特性について検討している。Judd-Offelt 解析を行うことによって、 $1.3 \mu\text{m}$ 発光の量子効率が、 ZrF_4 系フッ化物ガラスの 2 倍の値を持つことを明らかにしている。カルコゲナイドガラス、混合ハライドガラスなどの他の候補と、蛍光特性、低損失光ファイバ作製の可能性について比較検討を行うことにより、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラスを開発の目標としたことについて述べている。

第 3 章では、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラスのガラス組成について検討している。4 種類のガラス系を開発し、安定ガラス域を明らかにするとともに、熱特性の評価を行い、開発したガラス組成が、熱安定性に優れ、光ファイバ作製が可能であることを示している。また、ガラス組成を調整することによって、熱安定性を損ねることなく、屈折率を広い範囲で制御できることを示している。

第 4 章では、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系単一モード光ファイバの作製について示している。熔融法によるファイバ母材の作製、ジャケット延伸法によるコア直径の細径化、ファイバ線引きの各工程を示すとともに、低損失化を達成するために必須となる、フッ化物原料の高純度化について示している。

作製した $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系単一モード光ファイバは、比屈折率差 $\Delta n = 2.5, 3.7, 6.6\%$ の 3 種類で、波長 $1.2\ \mu\text{m}$ における損失値は、 $\Delta n = 2.5, 3.7\%$ のファイバにおいては、 $0.06\ \text{dB/m}$ と ZrF_4 系フッ化物光ファイバに匹敵する低損失を達成し、 $\Delta n = 6.6\%$ のファイバにおいては、 $0.25\ \text{dB/m}$ の損失値を得ることに成功している。

第 5 章では、作製した $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系単一モード光ファイバの増幅特性について検討している。 $\Delta n = 6.6\%$ の光ファイバを用いた増幅実験において、これまで最高の利得係数 $0.36\ \text{dB/mW}$ を得ることに成功している。 $\Delta n = 3.7\%$ の光ファイバにおいても、同様の諸元をもつ ZrF_4 系光ファイバの利得係数を上回る、 $0.26\ \text{dB/mW}$ を達成し、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系光ファイバが、 ZrF_4 系光ファイバよりも高効率であることを明らかにしている。

第 6 章では、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系単一モード光ファイバを用いた 3 種類の PDFA モジュールの開発について示している。プラグイン・タイプ PDFA モジュールでは、 $\Delta n = 6.6\%$ の $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系光ファイバ、2 台の波長安定化 $1.017\ \mu\text{m}$ 半導体レーザ、ファイバカップラ、アイソレータなどの光学部品を高密度に実装し、大きさ $15.24 \times 194 \times 247\text{mm}$ のアンプモジュール開発に成功している。このモジュールは、ITU-T（国際電気通信連合、電気通信標準化部門）が定めた、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯 $10\ \text{Gbit/sec}$ システムの中継器に要求される $10\ \text{dBm}$ の信号出力を達成し、低消費電力化にも成功している。

最後に、本論文は、新規に開発した $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラスを用いた単一モード光ファイバが、従来の ZrF_4 系単一モード光ファイバに比べ、増幅特性に優れること、また、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系単一モード光ファイバを用いた PDFA モジュールが、高利得、高出力特性に優れることを明らかにしている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 山 恒 義

副 査 教 授 山 下 幹 雄

副 査 教 授 田 中 啓 司

学 位 論 文 題 名

高効率プラセオジム添加フッ化物光ファイバ増幅器の研究

光ファイバ増幅器は、従来の光・電気変換が介在する光中継器にかわり海底伝送系、基幹伝送系への適用が進められているほか、ソリトン通信、波長多重通信システムなどの次世代の大容量・高速光通信システムを構築する上では必要不可欠な光部品として認識されている。波長 $1.3\mu\text{m}$ 帯で動作するプラセオジム添加フッ化物光ファイバ増幅器 (PDFA) は、高利得、高出力であることに加え偏波依存性がなく低雑音であることから、ラマン増幅器、半導体アンプなど他の $1.3\mu\text{m}$ 帯光増幅器に較べて実用的な光増幅器として期待されてきた。しかしながら、従来の ZrF_4 系フッ化物光ファイバを増幅媒体とする PDFA は、 $1.3\mu\text{m}$ 発光の量子効率が低いために高出力の励起光源を必要とする問題を有していた。プラセオジムにおいては、上準位とその直下に位置する中間準位のエネルギー間隔が狭いために、上準位が多フォノン緩和による非輻射遷移の影響を受けやすく量子効率が低下する。PDFA の効率改善にはフォノン・エネルギーの小さいガラスをホスト・ガラスとして用いることが有効であり、光ファイバに加工することが可能であるような新規ホスト・ガラスの開発が必要とされてきた。

本論文は、このような背景のもとで PDFA の高効率化について検討を行ったものであり、従来の ZrF_4 系フッ化物ガラスよりもフォノン・エネルギーの小さい $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラスを新規に開発し、ガラス化範囲、熱特性を明らかにするとともに、単一モード光ファイバの作製、高効率 PDFA モジュールの開発に関して述べたものである。本論文は全 7 章からなり、その主要な成果は次のように要約される。

第 1 章では、本論文の背景と目的が述べられている。光通信システムにおける光ファイバ増幅器の役割、これまでの PDFA 開発の経緯について概説している。

第 2 章では、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラス中のプラセオジムの蛍光特性について検討している。蛍光寿命測定および Judd-Ofelt 解析を行うことによって、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラス中の $1.3\mu\text{m}$ 発光の量子効率が ZrF_4 系フッ化物ガラス中の 2 倍の値を持つことを明らかにしている。またカルコゲナイドガラス、混合ハライドガラスなどの他の系と蛍光特性および低損失光ファイバ作製の可能性について比較検討を行うことにより、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラスが高効率 PDFA 用の増幅媒体として優れていることを示している。

第 3 章では、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラスのガラス組成について検討している。4 種類のガラス系を開発し、安定ガラス域を明らかにするとともに熱特性の評価を行い、開発したガラス組成が熱安定性に優れ、光ファイバ作製が可能であることを示している。また、ガラス組成を調整することによって、熱安定性を損ねることなく屈折率を広い範囲で制御できることを示している。

さらに、粘性評価、等温結晶化解析を行うことによって、低損失光ファイバ作製の可能性について明らかにしている。

第4章では、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系単一モード光ファイバの作製について述べている。溶融法によるファイバ母材の作製、ジャケット延伸によるコア直径の細径化、ファイバ線引きの各工程を示すとともに、低損失化を達成するために重要となるフッ化物原料の高純度化について述べている。作製した $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系単一モード光ファイバは、比屈折率差 $\Delta n=2.5, 3.7, 6.6\%$ の3種類であり、 $\Delta n=2.5, 3.7\%$ のファイバにおいては、損失値として 0.06 dB/m の低損失光ファイバの作製に成功している。

第5章では、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系単一モード光ファイバの増幅特性について検討している。 $\Delta n=6.6\%$ の光ファイバを用いた増幅実験において、これまで最高の利得係数 0.36 dB/mW を得ることに成功している。また、 $\Delta n=3.7\%$ の光ファイバにおいては、同様の諸元をもつ ZrF_4 系光ファイバの利得係数(0.21 dB/mW)を上回る 0.26 dB/mW を達成し、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系光ファイバが ZrF_4 系光ファイバよりも高効率であることを明らかにしている。

第6章では、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系単一モード光ファイバを用いたPDFAモジュールの開発について示している。MOPA-LD励起PDFAモジュール、Nd-YLFレーザ励起PDFAモジュール、プラグインタイプPDFAモジュールの3種類のモジュールを作製し増幅特性を評価している。プラグインタイプPDFAモジュールでは、 $\Delta n=6.6\%$ の光ファイバを用い、2台の波長安定化 $1.017 \mu\text{m}$ 半導体レーザ、波長合分波器、アイソレータなどの光学部品を高密度に実装することによって、大きさ $15.24 \times 194 \times 247 \text{ mm}$ のアンプモジュール作製に成功している。増幅特性としては 33.8 dB の小信号利得を達成するとともに、国際電気通信連合電気通信標準化部門(ITU-T)が定めた $1.3 \mu\text{m}$ 帯 10 Gbit/sec システムの中継器に要求される 10 dBm の信号出力を満足したことを示している。

これを要するに、著者は光通信システムへの適用が期待されている $1.3 \mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器において、 $\text{PbF}_2/\text{InF}_3$ 系フッ化物ガラスを新たに開発し、単一モード光ファイバを作製することによって高効率 $1.3 \mu\text{m}$ 帯光増幅器の作製に成功したものであり、応用物理学の発展に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、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。