

氏名	いっ しき くに ひこ 一色邦彦
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年9月9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	1. 3 $\mu$ m帯光ファイバ増幅器/レーザに関する研究
指導教官	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 水野 皓司 東北大学教授 宮城 光信

## 論文内容要旨

本論文は、1. 3  $\mu$  m帯プラセオジウム添加光ファイバ増幅器、及びプラセオジウム添加光ファイバ増幅器を用いた1. 3  $\mu$  m帯光ファイバレーザに関する一連の研究成果をまとめたものである。研究の第1の目的は、1. 3  $\mu$  m帯光通信システム用の後置増幅器や電力増幅器、ないしは中継増幅器としての実用化を目指して、高出力増幅を初めとする高い性能を有する1. 3  $\mu$  m帯光ファイバ増幅器を実現することである。研究の第2の目的は、1. 3  $\mu$  m帯光ファイバ増幅器の光源への応用を目指して、1. 3  $\mu$  m帯高出力光ファイバレーザを実現することである。

以下に、本論文の各章の要点、及び主な結論について述べる。

### 第1章 総論

第1章は総論として、研究の背景、研究の目的、及び論文の構成について述べている。

エルビウム添加光ファイバ増幅器の登場を契機として1. 5  $\mu$  m帯において光増幅方式による光通信技術が活発に研究され、一部実用化されている。光ファイバ通信においてもう1つの重要な波長帯である1. 3  $\mu$  m帯においても光増幅器の研究が進められており、幹線系、アクセス系、及び分配系の応用が期待されている。

1991年に登場した1. 3  $\mu$  m帯プラセオジウム添加Zr系フッ化物ガラス光ファイバ増幅器は、エルビウム添加光ファイバ増幅器に比べて量子効率が1桁低く、実用化に向けて更なる新材料研究が進められている。最近では、Zr系フッ化物ガラスの約2倍の量子効率をもつIn系フッ化物ガラスを主成分とするプラセオジウム添加光ファイバの実用化開発が進められている。励起光源としては半導体レーザや固体レーザ等が研究されている。半導体レーザは比較的光出力が低く、一方、固体レーザは高出力が可能ではあるが、装置が大型になり、消費電力も大きく、信頼性も十分には確認されていない。

また、1. 3  $\mu$  m帯光ファイバ増幅器は、光計測等、他分野への応用も期待され、その一つの形態として、光源としての1. 3  $\mu$  m帯光ファイバレーザの研究も行われている。

本論文では、励起光源として半導体レーザを用い、利得媒体としてIn系フッ化物ガラスを主成分とするプラセオジウム添加光ファイバを用いた1.3  $\mu$ m帯光ファイバ増幅器において、実用的な高い性能を実現するための一連の研究について述べる。さらに、その光源への応用を目指した1.3  $\mu$ m帯光ファイバレーザの研究について述べる。

## 第2章 励起用半導体レーザモジュール

第2章では、励起光源として用いる半導体レーザモジュールに関する研究として、半導体レーザと光ファイバとの光結合の高効率化、及び、半導体レーザの励起波長制御について述べている。

プラセオジウム添加光ファイバの励起を高めるためには、シングルモード光ファイバで構成されるプラセオジウム添加光ファイバに励起光を効率良く結合させる必要がある。さらに、プラセオジウム添加光ファイバが良く吸収する励起波長に、励起光の波長を一致させる必要がある。

GaAs系半導体レーザに特有の素子構造に起因して、プラセオジウム添加光ファイバ増幅器の励起用半導体レーザにおいては、楕円率の大きい出射ビーム形状であることが一般的である。このため、半導体レーザの楕円ビームと光ファイバの円形ビームとのモード不整合に起因して損失が生じる。そこで、偏波保持光ファイバの端面部付近のモードを部分的に楕円形状に加工する方式を半導体レーザの結合光学系に初めて応用し、モード不整合損失を低減でき、実用的な結合効率が実現可能であることを明らかにした。

また、光ファイバグレーティングから特定の波長の光を帰還させることにより、エルビウム添加光ファイバ増幅器の励起光源である0.98  $\mu$ m帯半導体レーザの発振波長を、プラセオジウム添加光ファイバ増幅器の励起波長帯にディチューニングでき、これにより、励起効率が向上することを明らかにした。この構成によれば、広く普及しつつあり、すでに量産されているエルビウム添加光ファイバ増幅器と部品を共用でき、プラセオジウム添加光ファイバ増幅器の実用化に際してメリットがある。

## 第3章 プラセオジウム添加光ファイバの特性解析

第3章では、プラセオジウム添加光ファイバに関する研究として、プラセオジウム添加光ファイバの性能を最大限に引き出すための光回路設計に必要な、プラセオジウム添加光ファイバの理論的な特性解析方法について述べている。

プラセオジウム添加光ファイバを用いて直接的に測定できる物性パラメータを用いてモデル化し、理論的に特性解析する方法を提案した。そして、In系フッ化物ガラスを主成分とするプラセオジウム添加光ファイバについて、計算値と測定値との比較により、この特性解析方法の妥当性を示した。そして、プラセオジウム添加光ファイバの飽和・小信号条件における光増幅特性、飽和出力・小信号利得の光ファイバ長依存性、及び多波長一括増幅特性を明らかにした。特に、飽和出力及び小信号利得に対してそれぞれに最適な光ファイバ長が異なり、この原因がプラセオジウム添加光ファイバ内の反転分布の違いに起因して説明できることを示した。

## 第4章 1.3 $\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器の高性能化

第4章では、1.3  $\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器の高性能化に関する研究として、装置を試作し、実用性能を検証した結果について述べている。

第2章で高効率光結合や波長制御を実現した励起用半導体レーザーモジュールと、第3章で特性解析して得た高効率プラセオジウム添加光ファイバとを組み合わせて、1.3  $\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器を試作し、高出力増幅特性を初めとする性能を評価した。

その結果、プラセオジウム添加 In/Ga 系フッ化物光ファイバ、及び1.01  $\mu\text{m}$ 帯半導体レーザーモジュール4台を用いた1.3  $\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器において、信号出力 +16.2 dBm (42 mW) の高出力増幅特性を実現した。+16.2 dBmは、これまでに報告されている半導体レーザー直接励起のプラセオジウム添加 Zr 系フッ化物光ファイバ増幅器と比べて約3 dB 高い信号出力である。この出力特性は、半導体レーザー1台を用いて製品化されているエルビウム添加光ファイバ増幅器の特性と同等の実用レベルのものである。

この1.3  $\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器を後置増幅器として用いて伝送実験を行い、光ファイバ100 km (損失34 dB) をエラーフリーで伝送可能とすることを確認した。これは、試作した1.3  $\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器が、デジタル光通信システムにおける後置増幅器として適用可能であることを示す結果である。

また、プラセオジウム添加 In/Ga 系フッ化物光ファイバ、及び0.98  $\mu\text{m}$ 帯半導体レーザーの発振波長をディチューニングした1  $\mu\text{m}$ 励起光源4台を用いて試作した1.3  $\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器において、4波多重信号光の一括増幅特性を測定した。波長範囲1.296~1.311  $\mu\text{m}$ における利得差が約2 dBと比較的小さいことを明らかにし、波長多重用中継増幅器としての適用可能性を示した。

## 第5章 1.3 $\mu\text{m}$ 帯高出力光ファイバレーザー

第5章では、1.3  $\mu\text{m}$ 帯高出力光ファイバレーザーに関する研究として、プラセオジウム添加光ファイバ増幅器を用いた光ファイバレーザーを試作し、光出力特性を検証した結果について述べている。

第4章で性能を検証した光回路と同様の構成のプラセオジウム添加 In/Pb 系フッ化物光ファイバ増幅器をリング型光共振器構成に組み込んだ光ファイバレーザーにおいて、分岐光カップラから光出力を最大限に取り出すための分岐比について設計した。

この設計に基づき、波長可変バンドパス光フィルタ、プラセオジウム添加 In/Pb 系フッ化物光ファイバ増幅器、及び出力用光カップラを光ファイバで接続した構成のリングレーザーを試作した。波長範囲1.29~1.33  $\mu\text{m}$ において、光出力10~28 mWという波長可変出力特性を得た。

## 第6章 結論

第6章では、第2章から第5章までの本論文の成果を総括し、結論とした。

## 付録A 窓構造による半導体レーザの高出力化

付録Aでは、1.3  $\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器の励起用半導体レーザに関連する研究として、窓構造による半導体レーザの高出力化について述べている。

GaAs系半導体レーザでは、端面の瞬時破壊により高出力動作が制限されるとともに、緩やかな端面劣化により信頼性が制限される。端面劣化を抑制する手段として1.3  $\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器の励起用半導体レーザに対しても有効と考えられる窓構造の高出力・高信頼化に対する効果について、信頼性に敏感な0.8  $\mu\text{m}$ 帯半導体レーザを用いて検証した。

検証に用いた素子構造は、窓構造と基本横モードを保つための狭いストライプ状の光導波路をZn拡散により同時に形成する窓構造拡散ストライプ型半導体レーザである。まず、基本横モードを保つための素子設計を行ない、次に、制御性の良い製作技術として、有機金属気相成長技術、及び開管法による2段階固相拡散技術を開発した。そして、0.8  $\mu\text{m}$ 帯窓構造拡散ストライプ型半導体レーザを試作し、高出力・高信頼動作を検証した。その結果、100 mWの高出力状態で基本横モード動作を実現した。また、50 mWの高出力動作において、5000時間の高信頼動作を確認した。なお、制御性の良い製作技術により、均一性の良い特性分布も得られた。

## 審査結果の要旨

1.3  $\mu\text{m}$  帯光通信システム用光増幅器として、高出力特性をはじめとする高い性能を有する光ファイバ増幅器の実現が求められている。著者は、利得媒体として In 系フッ化物ガラスを主成分とする半導体レーザ励起プラセオジウム添加光ファイバを用いた 1.3  $\mu\text{m}$  帯光増幅器について理論的および実験的検討を加え、実用的な性能を実現できることを実証した。またこの光ファイバ増幅器を用いた 1.3  $\mu\text{m}$  帯光ファイバレーザを構成し、高出力特性を実現できることを明らかにした。本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、全文 6 章よりなる。

第 1 章は総論であり、研究の背景、研究の目的、および論文の構成を述べている。

第 2 章では、励起用半導体レーザと光ファイバとの光結合の高効率化、および外部光帰還による半導体レーザの励起波長制御について述べている。

第 3 章では、プラセオジウム添加光ファイバ増幅器の特性解析について述べている。まず稀土類添加光ファイバの動作モデルを、直接測定可能な物性パラメータを用いて記述し、理論的に特性解析する方法を提案している。その結果を本論文で取り上げた In 系フッ化物ガラスを主成分とするプラセオジウム添加光ファイバの特性解析に適用し、動作特性を明らかにしている。これは重要な知見である。

第 4 章では、1.3  $\mu\text{m}$  帯光ファイバ増幅器の性能を実験的に検証した結果について述べている。第 2 章で高効率光結合や波長制御を実現した励起用半導体レーザモジュールと、第 3 章で特性解析して得たプラセオジウム添加フッ化物光ファイバとを組み合わせた 1.3  $\mu\text{m}$  帯光ファイバ増幅器において、信号出力 +16.2 dBm (42 mW) の高出力増幅動作を実現している。これを後置増幅器とした伝送実験を行い、100 km の光ファイバ伝送が可能であることを確認した。これは、試作した光ファイバ増幅器システムが実用レベルの性能を実現できることを明らかにしたもので、優れた成果である。

第 5 章では、プラセオジウム添加光ファイバ増幅器を用いた光ファイバレーザの発振特性について述べている。プラセオジウム添加光ファイバ増幅器を用いてリングレーザを構成し、1.29~1.33  $\mu\text{m}$  の波長範囲で出力約 30 mW という、高出力波長可変特性を得ている。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、1.3  $\mu\text{m}$  帯増幅器として重要なプラセオジウム添加光ファイバの特性解析方法を明らかにし、半導体レーザ励起による 1.3  $\mu\text{m}$  帯光ファイバ増幅器において実用的な性能を実証し、さらに、光ファイバ増幅器を用いた 1.3  $\mu\text{m}$  帯光ファイバレーザにおいて波長可変高出力特性を得たものであり、光エレクトロニクス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。