

氏名	林 英 明 はやし ひで あき
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学位記番号	人博第406号
学位授与の日付	平成20年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	人間・環境学研究科 関連環境学専攻
学位論文題目	Material Design of Rare Earth Doped Glasses for WDM Amplifiers (波長多重光増幅器用希土類ドープガラスの材料設計)
論文調査委員	(主査) 准教授 田部勢津久 教授 村中重利 准教授 木下俊哉 教授 平尾一之

論文内容の要旨

本学位申請論文は、光ファイバ通信システムにおける伝送ファイバの透過窓である $1.3\text{--}1.7\mu\text{m}$ の波長域において、高い増幅利得を有する波長多重(WDM)用光増幅器の材料設計指針を提示したものである。広帯域発光を示すエルビウム(Er)ドープ Bi_2O_3 系ガラスやフッ化物結晶の優れた発光特性と酸化物ガラスの安定性を兼備する希土類ドープオキシフロライド結晶化ガラスという二種類の新規なガラスやファイバを自ら作製し、光学特性評価と構造解析、レート方程式による光増幅特性のシミュレーションなどを通じて材料設計を行った。

第一章で希土類イオンの4f電子構造や発光の支配的因子、希土類ドープ光ファイバ増幅器の原理について述べ、さらにホストであるオキシフロライド透明結晶化ガラスの特徴、開発の経緯についても解説している。

第二章では、 Bi_2O_3 系ガラスErドープ光ファイバ(BIEDF)増幅器と導波路(Bi-EDW)の効率低下原因と対策を詳細に検討した。

第一節で、異なる条件で作製したガラス中のOH濃度を定量し、それと $\text{Er}^{3+} : {}^4\text{I}_{13/2}$ 準位の蛍光寿命の相関を調査することにより、OH基が $1.5\mu\text{m}$ 帯発光の失活原因であることを明らかにした。また、ファイバ作製工程で脱水処理を行うことにより、BIEDFの増幅利得性能が向上することを示した。

第二節では、ガラス組成へLa, Bを添加したBIEDFを新たに作製し、強励起条件下での蛍光寿命を測定した。その結果、La, Bの添加によって $1.5\mu\text{m}$ 帯発光始準位の寿命減少を回避できることを明らかにし、 Er^{3+} の利得低下原因である協同アップコンバージョン(CUP)の抑制を実験的に確認した。また Er^{3+} イオンの配位子場パラメータを求めることにより、局所構造変化が起こっていることも実証した。

第三節では、BIEDFを多段に接続して、そのファイバ間にフィルタを挿入することによって、増幅性能劣化の原因である自然放出光(ASE)が抑制され、C+Lバンド($1.55\text{--}1.61\mu\text{m}$)での高出力光増幅器が実現可能であることを示した。3段型BIEDFのファイバ長、および長さ比率を最適設計することにより、従来は長波長側で利得を得ることが難しかったC+Lバンド帯において、高効率(20dB)、高出力(20dBm)の4チャンネル粗波長多重(CWDM)光増幅器を提示している。また、ASEを考慮したレート方程式による理論解析を用いて実験結果との対比を行い、他の多段型増幅器の理論設計へも適用可能であることを示している。

第四節では、BIEDFの増幅効率が、接続損失や背景損失等を考慮に入れても理論値を達成していない原因を解析するために、積分球評価システムを新規に構築し、BIEDFからの横蛍光および散乱光パワーの定量評価を行った。上述の因子を含めて総合的な解析を行い、従来は光ファイバの出射端でしか評価できなかった増幅器の光パワー収支を全方位で明らかにしている。その結果、増幅信号光と比較して、無視できない光パワーが横蛍光によって消費されていることを明らかにした。また、CUPによる可視域発光のパワーとその始準位の量子効率を求めることにより、励起状態吸収の結果起こる上準位か

らの無輻射緩和によるパワー損失が、無視できないほど大きいことを明らかにした。さらに、レート方程式による理論解析により、CUP過程に続いて起こる無輻射緩和の効果を考慮する必要があることを示した。

第五節では、ファイバよりコンパクトなデバイス形状として、 Bi_2O_3 系 Er^{3+} ドープ光導波路 (Bi-EDW) の横蛍光特性を調査した。増幅媒体として同等のパラメータを有するBIEDFに比べ、Bi-EDWでは得られる利得が低いという欠点があったが、導波路部分における横蛍光や散乱光による損失はBIEDFと同等であることを明らかにした。利得性能向上のためには、接続部における損失等を低減していくべきであるというデバイス開発指針を示した。

第三章では、希土類ドープオキシフロライド透明結晶化ガラスの作製と発光特性評価を行い、光増幅器材料としての可能性を探索した。

第一節で、ガラスの熱処理による結晶化過程で、 Tm^{3+} が酸化物ガラス相からフッ化物結晶相中へ取り込まれ、フォノンエネルギー環境が変わることにより、無輻射損失が抑制され、Sバンド (1.45~1.48 μm) における発光特性が向上することを示した。また、低温発光特性の評価から、同材料がSバンド (1.48~1.53 μm) 光増幅器に応用できる可能性を見出した。

第二節では、 Tm^{3+} ドープ透明結晶化ガラスへの Ho^{3+} や Eu^{3+} イオンの添加により、1.4 μm 帯発光特性の改善を試みた。 Ho^{3+} や Eu^{3+} の共ドープにより、 Tm^{3+} の発光遷移の終端準位である $^3\text{F}_4$ 準位の寿命が抑制されることを示した。また、熱処理過程で Ho^{3+} や Eu^{3+} がフッ化物結晶相へ取り込まれることで $^3\text{F}_4$ 準位寿命はさらに低減し、反転分布改善に効果的であることを明らかにした。

第三節では、 LaF_3 析出 Er^{3+} ドープ結晶化ガラスを作製し、フッ化物相への配位環境変化に伴う発光特性変化について論じた。また、エネルギーギャップの小さい準位を発光始準位とする遷移ほど、その発光効率が、希土類の配位環境変化に敏感であることを明らかにした。

以上、本論文は、光増幅器の効率低下原因を総合的に定量解析するとともに材料設計によって Er^{3+} および Tm^{3+} の特定遷移を制御することで、1.4~1.6 μm の波長多重光ファイバ通信波長域においてキーデバイスである高効率な光増幅材料が作製可能であることを示した。

論文審査の結果の要旨

情報通信トラフィックの急激な増大に伴い、光ファイバ通信ネットワークの伝送容量を増加させるために、異なる波長の光信号を同時伝送する波長分割多重 (WDM) システムが重要である。光信号は伝送中に強度が減少するため、数十km毎に再生増幅を行う光増幅器は重要なデバイスである。WDMシステム内の光増幅器には、異なる波長の光信号を同時に増幅することが求められ、広帯域WDMを実現させるため、伝送用光ファイバの低損失領域である1.3~1.7 μm の波長帯域で光増幅可能なデバイス開発が不可欠である。最低損失波長域であるCバンド (1.53~1.565 μm) での優れた増幅特性、低雑音特性等の特徴から、シリカ系の Er^{3+} ドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) が広く実用化されている。しかし、シリカ系EDFAは、Lバンド (1.57~1.63 μm) の長波長側やSバンド (1.45~1.53 μm) では、利得が得られない。テルライト系ガラスホストを用いたLバンドEDFAが提案されているが、パワー変換効率が低いという課題があった。一方、Sバンド用としては、 Tm^{3+} イオンを用いた Tm^{3+} ドープ光ファイバ増幅器 (TDFA) が開発されているが、この1.4 μm 帯発光遷移はシリカガラスでは量子効率が低いので、フォノンエネルギーの低いフッ化物が用いられている。しかし、機械的強度の問題やファイバ化が難しいという課題があった。

本学位申請論文は、1.5~1.6 μm 帯で広帯域発光を示す Er^{3+} ドープ Bi_2O_3 系ガラスや1.4 μm 帯で発光を示す Tm^{3+} ドープオキシフロライド系透明結晶化ガラスを自ら作製し、これらの新規なバルクガラスやファイバの光物性と光増幅特性の評価を通じて実用的なWDM光増幅器の材料設計指針を提示したものである。

第一章では、希土類イオンの4f電子構造や発光の支配的因子、希土類ドープ光ファイバ増幅器の原理について述べ、さらにオキシフロライド透明結晶化ガラスの特徴、開発の経緯についても解説している。光増幅器がWDM通信用波長資源を全て増幅できていないことは現在のシステムにおけるボトルネックのひとつであり、材料による解決を示そうという本テーマに着目したことは物質機能の研究に携わる者として優れた着眼点を有していると評価できる。

第二章では、 Bi_2O_3 ガラス系EDFAのパワー変換効率を低下させる原因について定量的な解析を行い、各原因を抑制する

ための対策について検討を行っている。同章第一節では、ガラス中のOH基が Er^{3+} イオンの消光中心であり、濃度消光の主因であることを明らかにしている。作製工程での脱水処理により Bi_2O_3 系EDF (BIEDF) の利得特性が大幅に向上することを実証した。さらに、 Er^{3+} の4f準位間電子遷移と占有率の変化を考慮したレート方程式による理論解析から、OH基による失活効果の定量化を試みた本研究の意義は大きい。第二節では、ガラス組成へLa, Bを添加したBIEDFを作製し、 $1.5\mu\text{m}$ 帯発光始準位の寿命減少が無添加のBIEDFに比べて抑制されることを明らかにした。蛍光減衰曲線の解析から、La, B添加ファイバにおいて、利得低下原因である協同アップコンバージョン (CUP) の低減効果を定量化した。ファイバを用いて増幅特性についても比較しているため、ガラス材料構造とデバイス性能の関係について新たな知見を与えることができたと評価できる。第三節では、BIEDFを3段構成とし、ファイバ間に光フィルタを挿入し、長さ比率を最適設計することにより、C+Lバンド ($1.55\sim 1.61\mu\text{m}$) 帯において、高出力の4チャンネル光増幅器を提示している。また、レート方程式による解析を用いて実験との対比を行い、多段型増幅器の設計が可能であることを示している。デバイス設計により実用的な光増幅器を実現したこの研究は、申請者の学際分野に亘る研究遂行能力が具現されていると評価した。第四節では、BIEDFの増幅効率が理論値を達成していない原因を解析するために、積分球評価システムを新規に構築し、横蛍光および散乱光パワーの定量評価を行った。従来は光ファイバの出射端でしか評価できなかった増幅器の光パワー収支を全方位で明らかにした。本節で構築したファイバ横蛍光の解析手法は、市販のEDFや他の希土類ドープ光増幅器の解析などにも応用することができ、世界的な光増幅デバイス開発研究に与える波及効果は極めて大きい。第五節では、 Bi_2O_3 系 Er^{3+} ドープ光導波路 (Bi-EDW) の横蛍光特性を調査している。BIEDFに比べ、Bi-EDWでは利得が低いという欠点があったが、導波路部分における横蛍光や散乱光による損失はBIEDFと同等であることを明らかにした。利得性能向上のためには、接続部における反射損失等を低減していくべきというBi-EDWの今後の開発方向性を明示すると同時に、デバイス評価にこの積分球システムが有用であることを示した。

第三章では、希土類ドープオキシフロライド透明結晶化ガラスの作製を行い、発光特性評価を通して光増幅器としての応用可能性を探索している。第一節では、ガラスの結晶化過程で、ドープした Tm^{3+} が酸化物ガラス相からフッ化物結晶相中へ取り込まれ、 $1.4\mu\text{m}$ 帯発光効率が向上することを示した。また、低温で発光ピークが長波長シフトし、スペクトル形状が平坦化することから、本材料のSバンド光増幅器への適用可能性を示した。第二節では、 Tm^{3+} ドープ透明結晶化ガラスへの Ho^{3+} や Eu^{3+} イオンの添加により、 $1.4\mu\text{m}$ 帯発光遷移の終端 $^3\text{F}_4$ 準位の寿命が抑制されること、反転分布改善に効果的であることを明らかにした。第一、二節ともに、結晶化ガラス材料において、熱処理による配位環境変化を発光特性改善に有効利用できるという、オリジナルな知見を得たもので、既存のフッ化物ファイバ材料の欠点を克服した材料を開発できた成果となる。第三節では、 LaF_3 析出 Er^{3+} ドープ結晶化ガラスを作製し、フッ化物相への配位環境変化に伴う発光特性変化について論じている。熱処理過程において Er^{3+} イオンがフッ化物結晶相中へ取り込まれていることが確認され、その発光効率が、希土類の配位環境変化に敏感であることを明らかにした。

以上述べた様に、本学位申請論文は、通信用光増幅器の効率低下原因を総合的に定量解析するとともに材料設計によって希土類イオンの特定遷移を制御することで、 $1.4\sim 1.6\mu\text{m}$ の波長域で高効率なWDM用光増幅材料が作製可能であることを示している。希土類ドープガラスの基礎物性と構造の関係に新たな知見を与えるだけでなく、実デバイスにおける光増幅特性との関係を明らかにしたという点においても、光通信用デバイスの機能向上に対して大きな貢献をされると考えられる。また、物質の物性機能の解明を目指して創設された相関環境学専攻物質相関論講座にふさわしい内容を備えたものといえる。

よって本論文は博士 (人間・環境学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。