

氏名	おのしゅんすけ 小野俊介
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学位記番号	人博第294号
学位授与の日付	平成17年3月23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・環境学研究科環境相関研究専攻
学位論文題目	Optical Properties and Gain Characteristics of Erbium-Doped Fiber Amplifier (エルビウムドープ光増幅器の光物性と光増幅特性)
論文調査委員	(主査) 教授 村中重利 教授 林 哲介 助教授 田部勢津久

論文内容の要旨

本論文は、光通信システムに用いられる希土類添加型光増幅器、エルビウムドープファイバ増幅器 (EDFA) の光物性および光増幅器特性に関する研究である。

現在、EDFA は光伝送システムの長距離化、大容量化を実現するキーデバイスとなっており、光信号の多チャンネル化やネットワークシステムの高機能化を実現する、波長分割多重通信を実現する上で重要な役割を果たしている。

しかし、通信光増幅特性の劣化をもたらす、 Er^{3+} イオン間相互作用に起因する濃度消光や、波長分割多重通信において特定波長の信号光強度が強くなることにより、ある波長域での利得劣化が起こり、利得スペクトルの平坦性が損なわれる利得スペクトルホールバーニング現象等、解決がなされていない問題が残されている。

これらの問題に対して、ファイバ増幅器の光物性の系統的調査と諸条件下での光増幅特性に関する知見を得ることは、今後の光伝送システムの高速度化、大容量化に伴う EDFA の高機能化に必要であるだけでなく、アモルファスであるガラス固体としてのエルビウムドープファイバ (EDF) 中における Er^{3+} イオンの光物性と局所構造に対する基礎的理解を深める上でも重要と考えられる。

本研究は、光増幅用 EDF のさらなる高機能化を目標に、分光学的な手法を基にして光通信デバイスの機能とガラス固体材料光物性の二領域を包括する学際的な研究である。

第一章では、これまでの光伝送システムの長距離大容量化における、光増幅器の果たした役割を述べ、光通信発展の観点から EDFA 開発と高機能化の経緯を総括している。

第二章では、バルクガラスではなくファイバ形状のままのアルミノシリケート EDF を用いて、 Er^{3+} イオンの 4f 電子遷移理論に基づく分光学的光物性研究を行った。その結果、バルクガラス中とファイバ中における Er^{3+} イオンの配位子場の違いを見出し、遷移確率計算と蛍光寿命測定により、EDF 中のアルミナ含有量の増加に伴い、 Er^{3+} イオンの 1.55 μm 発光の量子効率が上昇することを明らかにした。

第三章では、光ファイバ長さ方向での Er^{3+} 電子占有率の変化のレート方程式および Er^{3+} イオンのエネルギー準位構造と電子占有率の Boltzmann 分布を基にした、McCumber 理論に基づく EDF 利得シミュレータを構築し、現行の通信波長より短波長側である、S-band 帯域 (1480nm-1530nm) における EDF 利得特性の検討を実験および理論面から行った。その結果、ファイバの温度上昇により 0.2dB/m の利得係数の改善が期待できることを示し、S-band 帯域における McCumber 理論の適用可能性を 77K-373K の温度領域における実験値との比較により示した。

第四章では、第三章で構築したシミュレータに Er^{3+} イオン間の濃度消光による反転分布占有率劣化の項を組み込み、光増幅利得特性劣化の検討を、高濃度 Er^{3+} ドープ EDF の増幅利得実験を併せて、定量的に行った。その結果、全 Er^{3+} イオンの 2% 程度のイオンのクラスタリングによっても光増幅特性が大きく影響を受けることを実験的に明らかにし、またこれを計算によっても裏付けた。

第五章及び第六章では、EDFにおける利得スペクトルホールバーニング（GSHB）現象を低温において実験的に測定し、その利得スペクトル変化のファイバ組成依存性の検討及び、ホール形成メカニズムの検討を行った。その結果、 Er^{3+} の高濃度化によりホール深さが減少するという濃度依存性の存在を明らかにした。これはGSHBがイオン間のエネルギー移動により緩和されること、濃度消光と光増幅特性に関してトレードオフの関係にあることを示している。加えて、メインホールに伴うサイドホールが存在することを均一線幅が狭くなる低温において、初めて明らかにした。このスペクトルを詳細に解析した結果、GSHB現象が Er^{3+} イオンの有する Stark エネルギー準位構造に密接に関連していることを初めて明らかにした。

論文審査の結果の要旨

1990年代前半に世界中の光ファイバ通信システムに導入実用化されたエルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）は、伝送用光ファイバ中を100kmにわたり伝送されて、強度が約100分の1になった信号光（時分割で情報を載せた変調パルスレーザー光）の位相や波長を保持したまま、光強度を千倍一万倍に増幅することができるデバイスである。このため、これまでの光→電気→電気増幅→光という変換プロセスを経る光中継器に比べ、光を直接光で増幅できる、雑音が少ない、伝送用光ファイバに直接接続できるといった、有利さだけでなく、わずか10mW程度の光励起により、千倍（30dB）の増幅利得を実現できる。その圧倒的な性能が故に、急速に世界的に普及がされ、国際電話の音質の飛躍的向上や、波長分割多重技術との融合により、今日のインターネット情報量の大容量化を可能とした、革新的なデバイスである。

この優れた光増幅機能を可能にしているのが、シリカガラス中にドープされたエルビウム（ Er^{3+} ）イオンの4f電子エネルギー準位である。現在光ファイバの損失が最低となる波長は1550nmであるが、 Er^{3+} イオンの安定な第一励起準位から基底状態への発光遷移はこの波長に合致するので、誘導放出によって、微弱な信号光を増幅することができる。Erは、光ファイバのコア中に閉じこめられているが故に、そのエネルギー準位構造から1480nmや980nmという安価なレーザーダイオードによっても容易に反転分布を形成し得るため、その高い増幅利得性能を有するといえる。しかしながら、このエルビウムドープファイバ増幅器（EDFA）は、以下の様な問題を抱えており、光通信システムの高機能化を目指すために、その解決が望まれている。

1. 高い利得を実現できるためのErイオンのドープ量が1000ppm以下であるために、30dBの利得を得るためには10m以上の長さのファイバが必要となる。
2. 大容量通信のための波長分割多重通信で複数のチャンネルを同時伝送しているときに、あるチャンネルの光信号が強くなると、利得の波長平坦性が失われ、利得スペクトルにホールが形成される。

本学位申請論文は、革新的実用デバイスが現在抱えている、以上の様な問題を踏まえ、エルビウムドープファイバの光物性と光増幅特性を、アモルファス固体であるガラスの基礎光物性とドープされた、 Er^{3+} イオンの4f電子エネルギー準位構造まで掘り下げて、分光学的基礎研究を行ったものである

第一章では、光伝送システムの長距離大容量化における、光増幅器の果たした役割を述べ、光通信発展の観点からEDFA開発と高機能化の経緯を総括している。

第二章では、バルクガラスではなくファイバ形状のままのアルミノシリケートEDFを用いて、 Er^{3+} イオンの4f電子遷移理論に基づく分光学的物性研究を行った。その結果、バルクガラス中とファイバ中における Er^{3+} イオンの配位子場の違いを見出し、遷移確率計算と蛍光寿命測定により、EDF中のアルミナ含有量の増加に伴い、 Er^{3+} イオンの1550nm発光の量子効率が上昇することを明らかにした。この研究は、これまで、とかく物性研究者が光ファイバという新しい形状の固体試料で物性評価を行ってこなかった経緯を鑑みると、実用デバイスを構成する材料への基礎科学からの新しいアプローチを行ったという観点からも高く評価できる。

第三章では、 Er^{3+} イオンの光増幅機能発現の基礎である、4f電子エネルギー準位内での電子遷移と占有率の変化を考慮したレート方程式、および Stark エネルギー準位構造とその電子占有率の Boltzmann 分布を考慮した McCumber 理論に基づいて、EDF 利得シミュレータを構築している。とくに今後の通信帯域拡大のために重要である、S-band(1480nm-1530nm)は、現行の通信波長より短波長側であり、この波長域における EDF 利得特性の検討を実験および理論面から行

っている。実験とシミュレーション解析の結果、ファイバの温度上昇により 0.2dB/m の利得係数の改善が期待できることを示し、S-band 帯域における McCumber 理論の適用可能性を 77K-373K の温度領域における実験値との比較により示した。実験面のみならず理論面からファイバ長さ方向にわたる光増幅現象を定量的に再現するという、申請者の研究遂行能力が具現されていると評価した。

第四章では、第三章で構築したシミュレータに Er^{3+} イオン間の濃度消光による反転分布占有率劣化の項を組み込み、光増幅利得特性劣化の検討を、高濃度 Er^{3+} ドープ EDF の増幅利得実験を伴わせて、定量的に行っている。その結果、全 Er^{3+} イオンの 2% 程度のイオンのクラスタリングによっても光増幅特性が大きく影響を受けることを実験的に明らかにし、計算によっても裏付けた。この研究結果は、シリカガラス固体中で、希土類であるエルビウムイオンがどのような分散状態にあるかということ、EXAFS のような構造解析手段以外で評価し得る道を示したと見なすこともでき、光物性評価がアモルファス構造に関する知見を与える可能性を示している。

第五章及び第六章では、波長分割多重通信システムにおいて実用的に問題となっている、利得スペクトルホールバーニング (GSHB) 現象を低温において実験的に測定し、その利得スペクトル変化のファイバ組成依存性の検討及び、ホール形成メカニズムの検討を行っている。その結果、 Er^{3+} の高濃度化によりホール深さが減少することを明らかにした。加えて、信号波長においてメインホールの両端にサイドホールが存在することを、均一線幅が狭くなる低温での実験において、初めて明らかにした。このスペクトルを詳細に解析した結果、GSHB 現象が Er^{3+} イオンの有する Stark エネルギー準位構造に密接に関連していることを明らかにした。EDFA は実用デバイスであるが故に、主たる研究が室温で行われ、とかく低温での物性データが不足している状況であるが、本研究は、低温で明確なスペクトル構造を観測することができた故に、GSHB の機構に対する新たな知見を与えることもできた。

以上述べた様に、本学位申請論文は、エルビウムドープ光ファイバ増幅器の基礎光物性と光増幅特性に対して、新たな知見を与えるだけでなく、光通信システムの機能向上に対して、大きな貢献をすると考えられる。また、物質の物性機能の解明をめざ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17年1月18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。