

論文の内容の要旨

論文題目 低損失テルライト光ファイバとその広帯域光増幅器への応用

氏 名 森 淳

Er³⁺添加光ファイバ増幅器の出現は、光ファイバ通信における距離（損失）という制限要因を取り除き、1万km以上に及んで3R再生中継器を必要としない海底光通信をも実現するという革命をもたらした。通信容量が年々加速度的に増大するのに伴い、通信の大容量化を経済的に進めるため波長分割多重（WDM）伝送方式の導入が進んでいるが、この方式を実現することができるのはEr³⁺添加光ファイバ増幅器が複数の波長の信号を一括増幅することが可能なためであった。しかしながら、このWDM伝送方式における通信容量の大容量化は信号のチャンネル数をどこまで増やせるかに大きく依存しており、伝送ファイバや信号送受信器においては既に十分な帯域を有しているため、光ファイバ増幅器の増幅帯域が制限要因となっているのが現状である。

本研究は、WDM伝送方式における更なる大容量化に向けて、増幅器用光ファイバの材料ガラスを従来用いられてきた石英系ガラスからテルライト（TeO₂）ガラスに置き換えることにより、光増幅器の増幅帯域を飛躍的に拡大することを目的とする。具体的には、テルライトファイバ及びEr³⁺を添加したテルライトファイバの低損失化を図り、これらを用いて広帯域であるだけでなく、実用的なEr³⁺添加テルライトファイバ増幅器（EDTFA）及びテルライトファイバラマン増幅器を実現することであり、以下の7章から構成されている。

第1章「序論」では、光通信システムにおける光増幅技術の役割、光増幅技術の種類と特徴、WDMシステムの進展と広帯域光増幅器について記述し、本研究の目的と論文の構成を明らかにした。

第2章「テルライトガラスの基本特性」では、TeO₂-Bi₂O₃-ZnO-Li₂O系及びTeO₂-Bi₂O₃-ZnO-Na₂O系ガラスを作製し、ガラス化範囲、結晶化に対する熱安定性、光透過特性及び屈折率波長分散などの基礎物性を明らかにした。特に、TeO₂-Bi₂O₃-ZnO-Li₂O系において熱的に極めて

安定でかつ透過特性にも優れた組成を見出し、Er³⁺を添加した同ガラスの光吸収・発光及び発光寿命などのEDTFAの基本となる物性を明らかにした。更に、同ガラスのラマン散乱を測定し、ラマン散乱強度が純粋石英の30倍程度強く、ラマンシフト量も大きいことを見出した。

第3章「テルライトファイバの低損失化」では、単一モードテルライト光ファイバの作製について検討した。単一モード光ファイバの作製はサクシオンキャスト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径の細径化、ジャケット線引き法による光ファイバ線引きにより行った。特に、テルライトファイバの低損失化を達成するためにはTeO₂原料の高純度化は必須であり、これによりEr³⁺添加テルライトファイバにおいて27 dB/km@1.23 μmを達成した。また、ラマン増幅器用ファイバでは、これまでEr³⁺の吸収により顕在化していなかった1.5 μm帯のOH基による吸収が損失増大の原因となっており、熔融前の原料の脱水工程を導入することにより、20 dB/km@1.56 μmを実現した。

第4章「Er³⁺添加テルライトファイバ増幅器(EDTFA)」では、まずEr³⁺添加テルライトファイバの基本的な増幅特性を示し、次に実用的な利得平坦型C+L帯一括型増幅器及びL帯増幅器を構成し、増幅特性を詳しく調べた。基本的な増幅特性として、反転分布状態と増幅帯域および利得の長波長限界、励起波長と雑音指数、利得制御性、温度依存性、スペクトルホールバーニング、L帯における四光波混合の抑制について検討した。EDTFAの最大の特徴である増幅帯域の広帯域性は、誘導放出断面積が短波長側及び長波長側の両方で強く裾を引いていること、及びシグナルESA断面積が長波長側から立ち上がっていることに起因していることを明らかにした。反転分布状態を中間状態に設定した場合、1600 nm付近に盛り上がった特徴的な誘導放出断面積のために、CからL帯までを一括で増幅する増幅器が可能となる。しかしながら、利得偏差が大きいため、利得平坦化、低雑音指数及び高出力化を同時に実現するには3段のEDTF間の2箇所利得等化器を挿入する構成にする必要があることを示した。同構成により、石英系のEDFAでは不可能であったC+L帯70.8 nm一括増幅の実用的な増幅器を実現した。また、EDTFをL帯に適用した場合、及びL帯より更に長波長のE(extended)L帯に適用した実用的な増幅器を作製した。これらの増幅器を用いた並列型の増幅器を示すと共に有用性を確認するために、伝送実験への適用例を示した。

第5章「テルライトファイバラマン増幅器」では、テルライトガラスの大きな非線形屈折率とファイバの低損失化により、石英系ファイバ以外では初めて実用的なファイバラマン増幅器を実現した。誘導ラマン散乱係数を石英系ファイバと比較し、ピークの散乱係数が16倍、ストークスシフトが1.7倍であること、更に、散乱スペクトルが石英系ファイバでは単峰性であるのに対して、テルライトファイバでは双峰性を示すことを明らかにした。次に、従来の石英系ラマン用ファイバの1/10程度の長さである250mのテルライトファイバを多波長励起することにより、160 nmの超広帯域一括増幅に成功した。次に、本アンプを実用的な光増幅器とするため、石英系ファイバラマン増幅器とのハイブリット構成を採用し、更に伝送ファイバを用いた分布ラマン増幅技術を付加することにより、124 nm帯域313チャンネルの10Gbit/s信号を一括中継増幅伝送することに成功した。

第6章「テルライトファイバ及びファイバモジュールの信頼性」では、テルライトファイバの高強度化、ファイバモジュール化した場合のファイバの寿命を評価すると共に光部品の標準的信頼性評価法であるBellcore Technical Advisory TA-AWT-001221に準拠した試験、及び光信号を増幅した状態での長期動作安定性試験を行った。ファイバ母材表面のウエットエッチング処理に

より、ファイバ強度は平均 469MPa (最大 603MPa) に向上し、同ファイバを用いた寿命推定試験の結果、40 mmを越えるボビン径に対して 25 年以上 (許容故障率 10^{-6}) の寿命が確保できることを明らかにした。Bellcore仕様に従った 6 試験いずれにおいても故障はなく、テルライトファイバモジュールが実用環境下で十分な安定性を有することを明らかにした。また、長期動作安定性試験からテルライトファイバモジュールが実用動作条件下で安定した増幅動作が可能であることを示した。

第 7 章「総括」では、本研究を総括した結論を記述した。