

「ガラスの局所構造設計により通信帯発光特性を制御」

—波長多重通信のための広帯域光増幅器設計を実現—

京都大学 総合人間学部 田部 勢津久

波長多重情報通信システムの広帯域化が期待されているが、そのためには、広い波長範囲において、増幅利得を有する光増幅器の開発が急務である。受賞者は4f電子遷移を利用した希土類含有ガラスにおいて、非晶質の局所構造解析を各種分光法を用いて行い、光学遷移理論に立脚して配位子場構造と光物性の関係を解明した。また高効率材料を開発するために、4f電子遷移確率、量子効率や近赤外発光スペクトルの帯域を支配する因子を抽出し、諸因子の制御により広帯域光増幅器材料の設計を行った。とりわけ酸化物ガラスにおける組成と配位子場構造の關係の系統的体系化を、C+L帯(1.53-1.61 μm)の広帯域Erドーブ重金属酸化物ガラス材料と、S帯(1.45-1.52 μm)光増幅器用のTmドーブ酸化物ガラスの開発に結びつけた。

1. 背景

情報通信トラフィックの急激な増大を受け、波長多重通信システムの広帯域化が期待されている。政府のフォトニックネットワーク研究会の提唱している、2010年の超高密度波長多重通信(super DWDM)システムの実現のためには、伝送用シリカ系光ファイバの波長資源を有効利用することが不可欠であり、現状の1.55 μm 帯だけでなく、1 μm から1.65 μm の広範囲にわたる光増幅器の開発が必要である。SiO₂基のErドーブファイバンプ(EDFA)でカバーされるC-バンド(1.53-1.56 μm)以外の他の波長域の利用と動作可能な光増幅器の開発のためには、ホスト材料設計によるEr発光の広帯域化、Er以外の希土類イオンの利用と広帯域化が課題となる。しかしこれまでに、ガラス中の希土類イオンの局所構造は明らかでなく、4f電子遷移に基づく発光特性との関係や効率向上のための構造制御と機能設計指針は明らかでなかった。

2. 研究の成果

受賞者は4f電子遷移を利用した希土類含有ガラスにおいて、光学遷移理論の知識に立脚し、それを非晶質に応用するために、局所構造解析手段として各種分光法を用い、構造と光物性の関係を解明した。また高効率材料を開発するために、遷移確率、量子効率や発光スペクトルの帯域を支配する因子を抽出し、諸因子の制御により、4f電子エネルギー準位に応じた光機能の設計を行った。とりわけ受賞者のガラスにおける組成と配位子場構造の系統的データ蓄積により、広帯域通信用材料開発に結びついた。以下に業績の概要を記す。

種々の酸化物ガラス中における希土類イオンの局所構造解析

各種の複合酸化物結晶中の¹⁵¹Eu核のメスバウアー効果測定を行い、異性体シフトとEu³⁺イオンの配位数(6~12)の間に明確な相関が成立すること、およびそれがEu³⁺の6s電子密度の違いに起因することを明らかにした。更に構造未知のガラスに適用を試み、SiO₂のみならず、多様な各種ガラス中で、組成と配位数の関係を調べ、ガラス中での希土類の配位数の支配因子を明らかにした。またフォノンサイドバンドの測定により、ガラス網目形成カチオンと酸化物イオンの伸縮振動モード(B-0, P-0, Si-0, Ge-0, Te-0, etc...)が希土類イオンに結合し、無輻射多フォノン緩和に寄与していること、フォノンエネルギーがEr, Tm, Pr, Dyイオンなどの発光の量子効率に影響を与えることを系統的に明らかにした。

希土類イオンの電子状態と4f電子遷移確率の關係解明

Er³⁺, Nd³⁺, Tm³⁺イオンをドーブした各種多成分ガラスに対してJudd-Ofelt解析を行い、特定の電気双極子遷移確率を決定する⁶配位子場パラメータとメスバウアー異性体シフトの間に負の相関が成り立つことを発見した。この⁶パラメータが4fと5d軌道の重なり積分に依存することを理論的に導出し、ガラス中の希土類-配位子の化学結合の共有結合性を下げれば、その特定遷移の確率が向上することを示した。この提言は、Er³⁺とPr³⁺イオンにおける1.55 μm と1.3 μm 発光遷移確率向上に結びつき、特に広帯域EDFA材料の組成設計指針に決定的な方向性を与えた。

広帯域Erドーブ

光増幅器用ガラス材料の設計

上記の設計指針を基に、Er³⁺含有テルライト(TeO₂)とピスマス(Bi₂O₃)系ガラスがC+Lバンド(1.53-1.61 μm)にわたり波長幅80nmを越える優れた発光特性を有すること、それが高い⁶と屈折率による電気双極子遷移確率の磁気双極子遷移確率に対する優位性によること、優れた希土類分散能により濃度消光が抑制され、高濃度でも高効率を示すため、ファイバの短尺化が可能なることを実験的に明らかにした。

Sバンド増幅用Tmドープ光増幅器用酸化ガラス材料の開発

1.55 μm帯に次いで低損失波長資源であるSバンド（1.46～1.52 μm）光増幅器として、既存のフッ化物材料ではなく、低フォノンエネルギー酸化ガラスが、高い量子効率を有することを理論的に予測し、Judd-Ofelt解析と蛍光寿命測定により、90%の量子効率を実証した。同時に、これまでの約1.5倍の発光帯域を有するTmドープテルライトとビスマスゲルマネートガラスを開発した。また共ドープメントにより反転分布が変化することを立証し、Ndガラスをクラッドに用いると800nmのASE抑制に役立つことを考案した。

以上、広帯域通信用希土類光増幅器ガラスについての明確な理論的材料設計指針の提案とそれに拠る材料開発実績が、国際的に高く評価され、多くの招待講演を行っている。

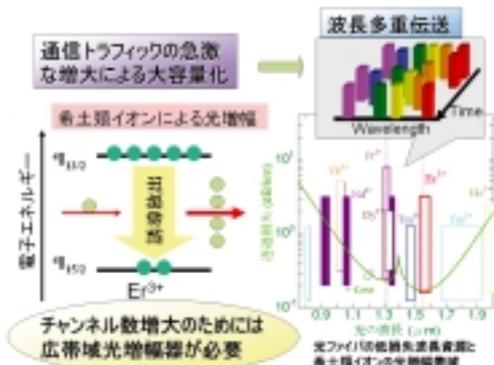


図 光ファイバの低損失波長資源と希土類イオンの光増幅帯域

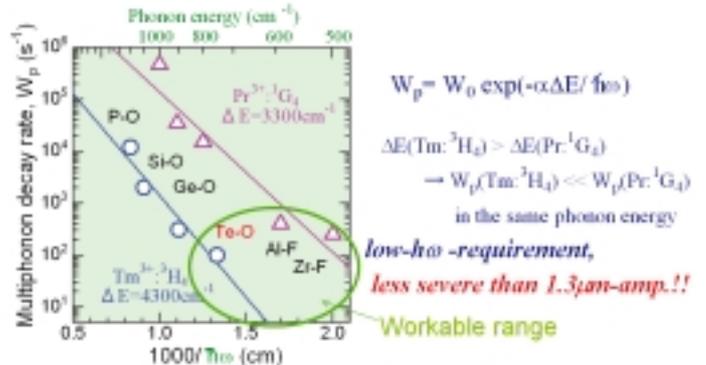


図 エネルギー準位に応じた最適ホストの選択

補足説明

4f電子軌道

原子を構成する電子軌道の内、主量子数4で方位量子数が3の軌道で、電子を2ヶまで収容できる軌道が7つある。希土類元素は、原子番号が57のLa（ランタン）から71のLu（ルテチウム）までの15種類の4f軌道遷移系列元素群であり、周期律表のIIIB族に属するため、一般に3価が安定である。このうちCe³⁺（セリウム）からYb³⁺（イッテルビウム）までの13種類のイオンは、1ヶから13ヶの4f電子を有し、電子配置の違いに基づく、多様なエネルギー準位を形成する。異なる準位間の電子遷移エネルギーは紫外、可視、赤外光に相当するので、多くの希土類イオンは、これらの波長で光の吸収、発光を起こす。

エルビウム（Er）

原子番号68、無機化合物中では3価イオンのみが安定で、4f軌道に11ヶの電子を有する。極めて安定な第一励起準位から基底状態への、3準位系1.55 μm発光遷移を有するため、始めにシリカファイバをホストとする通信光増幅器として1989年に実用化された。

ツリウム（Tm）

原子番号69、3価イオンが最も安定で、4f軌道に12ヶの電子を有する。第3励起準位から第1励起準位への波長1.46 μmの発光遷移が存在するが、通常のシリカガラス中では発光効率が極めて低い。現状ではフッ化物ファイバのSバンド光増幅器が提案されている。フッ化物ガラスファイバは、酸化物に比べ、強度、信頼性及び耐久性に劣るため、光通信分野では普及していない。

参考文献

1. 田部 勢津久、「テレコムフロンティア」25、pp.26-33、1999.
2. S. Tanabe, in "Glass Science and Technology on the Threshold of the 3rd Millenium", (ed.W.Pannhorst, Deutschen Glastechn. Gesellschaft, Frankfurt, 2001) pp.67-82.
3. S.Tanabe, Proc. SPIE, vol.4282, "Rare-Earth-Doped Materials and Devices V",(Photonics West, Optoelectronics 2001,San Jose, Jan., 2001) pp.85-92.
4. S.Tanabe, X.Feng, T.Hanada, Opt.Lett. 25, pp.817-19, 2000.
5. S.Tanabe, J.Non-Cryst.Solids 259, pp.1-9, 1999.
6. S.Tanabe, T.Ohyagi, S.Todoroki, T.Hanada, N.Soga, J.Appl.Phys.73, pp.8451-54, 1993.
7. S. Tanabe, K. Hirao, N. Soga, J. Non-Cryst. Solids 113, pp.178-184, 1989.
8. S. Tanabe, N. Sugimoto, S. Ito and T. Hanada, J.Lumines.87-89, pp.670-672, 2000.
9. S. Tanabe, T. Hanada, M. Watanabe, T. Hayashi, N.Soga, J.Am.Ceram.Soc. 78, pp.2917-22, 1995.
10. 田部 勢津久、「波長多重通信用光増幅器における4f電子遷移確率の制御と広帯域発光材料の開発」、「希土類」No.41、pp.1-10、2002.