

広帯域ファイバ増幅器用特殊ガラス

コーニング インコーポレイテッド

ジェフリー T. コーリー, ジョン D. ミネリー,
ジェームズ E. ディッキンソン, ダグラス E. ゴフォース,
竹内 善明 (訳)

Specialty Glasses for Broad-Band Fiber Amplifiers

Jeffrey T. Kohli, John D. Minelly, James E. Dickinson,
Douglas E. Goforth, Yoshiaki Takeuchi (Translation)

Corning Incorporated

1. はじめに

Er-ドープファイバ増幅器の出現と商用化は長距離通信システムのコストと将来性に多大な衝撃をもたらした。銅線網や光ファイバ網を用いた通信システムでは、伝送中の信号が減衰するため、ケーブルの途中の様々な接続点で信号増幅が要求される。初期の光ファイバ網では電氣的な増幅が行われていたので、光信号を電気信号に変換する必要が生じた。ここではリピータと呼ばれる部品が信号の増幅と整形に用いられており、信号の流れを整理する役割もしていた。しかし、これは高価で、大きく、かなり非効率なものであった。それに対し、光ファイバ増幅器は信号の光と電気の間の変換を必要としない。最も単純な場合、ファイバ増幅器は入力されるデータの流れを異なる波長のポンプ信号と結合し、増幅する。元の信号波長は位相が損なわれることなく、増幅され、出力される。

長距離伝送用光ファイバは基本的に GeO_2 - SiO_2 の 2 成分系ガラスでできているが、このガラス系の光ファイバで最も伝送損失の少ない波長領域は $1.5\ \mu\text{m}$ ~ $1.6\ \mu\text{m}$ である。実際、光ファイバケーブルのこの領域での受動損失は約 $0.25\ \text{dB/km}$ 以下である。増幅器は典型的には 80 ~ $100\ \text{km}$ の間隔で設置される。このため増幅器では少なくとも $23\ \text{dB}$ のゲインが必要となる。幸運にも、Er イオンの電子エネルギー準位に拠れば、 1.5 ~ $1.6\ \mu\text{m}$ 帯のほぼ全域（特に 1530 ~ $1610\ \text{nm}$ の波長範囲で）で充分な光増幅が可能である。我々は一般にこの領域を $1.5\ \mu\text{m}$ 帯と呼ぶこととする。次の章では Er イオンの物理について議論するが、Er 以外の活性イオンを用いた増幅も可能である。

2. Er イオンの物理

Er イオンの電子エネルギー準位を Fig. 1 に示す。基準形での Er の外殻電子は $[\text{Xe}]4f^{12}6s^2$ 配位にある。しかし、ガラス中で Er は $[\text{Xe}]4f^{11}$ 配位の 3 価イオンとなる。3 価の Er イオンの基底状態は $^4I_{15/2}$ と表され、スピン多

様性 ($2S+1$) は4, 全角モーメントの量子数 (L) は1, 総角モーメントの量子数 (J) は $15/2$ となる。

Fig. 1 より Er^{+3} は3準位のレーザ系を示す。準位1は基底状態, 準位2は準安定状態を, 準位3は励起状態を表している。Fig. 1の各準位は狭く, 独立したエネルギー状態として表されているが, 実際は広がった集合体をもつ。例えば, これらの準位の広がりにより, 1480 nm レーザを用いた $^4\text{I}_{13/2}$ 準位への励起が可能となる (詳細はIII章で議論する)。この広がり機構の1つは良く知られるシュタルク効果によるもので, 電子とその周囲の配位子との相互作用によりエネルギー準位が分裂する。 $^4\text{I}_{15/2}$ 準位は8つの副準位に, $^4\text{I}_{13/2}$ 準位は7つの副準位に分岐する。結果として, これらの2つの集合体の間には遷移確率の異なる57種類の遷移が理論的に存在する。

スペクトルが広がる第2の機構は不均一効果と呼ばれる。これは材料中で活性化 Er イオンが多様なサイトに位置するために生じる。結晶性材料中の活性イオンは, その材料の結晶構造に依存したただ1つの特別なサイトのみに

存在するのが普通である。しかし, Er をドープした希土類フッ化物ガラスは $1.5\ \mu\text{m}$ 帯で多様なスペクトルを示す。これは不均一広がりによるものというより, Er にとって代られる3価イオンのイオン半径に依存してスペクトル形状が大きく変化するためであろう。ガラスのようなアモルファス中では, すべてのサイトが似たような状態にあるので, Er^{+3} イオンが多様なサイトを占める確率は非常に大きくなる。 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 遷移の線幅 (FWHM) は Er ドープ・シリカガラスでの約8 nm からフッ化ハフニウム系ガラスの約64 nm まで変化することが報告されている¹⁾。更に, 後に示すように, $1.5\ \mu\text{m}$ 発光帯の形状とピークは大きく変わらう。均一に広がった遷移の重要な効果として, 所謂ポンプ波長 (Fig. 1の1と2の準位間の遷移) がすべての Er イオンと等しい確率で作用する。もし不均一な広がりがあれば, 発光スペクトルはポンプ波長の変化とともに変化する。

Er ドープ増幅器はポンプ光励起により反転分布が得られた場合に利得を生じる。Fig. 1に示したような3準位レーザ系では, 電子の存在確率が基底状態よりも, $^4\text{I}_{13/2}$ 準位に多い場合に対応する。(980 nm でポンプしている場合) 利得過程が効果的になるには無輻射遷移時間 (τ_{32}) が短く, 蛍光寿命 (τ_{21}) が長い必要がある。そうすれば, 多くの電子は $^4\text{I}_{13/2}$ 準位に存在し得る。典型的な Al ドープ石英系増幅器の τ_{32} は一般的に $15\ \mu\text{s}$ 以下で, τ_{21} は約10 ms である。非励起状態では Er ドープファイバ増幅器 (EDFA) は $1.5\ \mu\text{m}$ の入力信号を基本的に100%吸収する。しかし, 全て励起された EDFA では基本的に第1と第2の準位間 (Fig. 1) の100%発光が得られ, 吸収は生じない。これらの2つの極端な状態をそれらの間の中間状態と共に Fig. 2に示す。実際, 最も平坦な増幅は約60~65%の反転状態で得られる。各々のチャンネルで均等な増幅を得るにはその波長帯域内での増幅の平坦化が必要とな

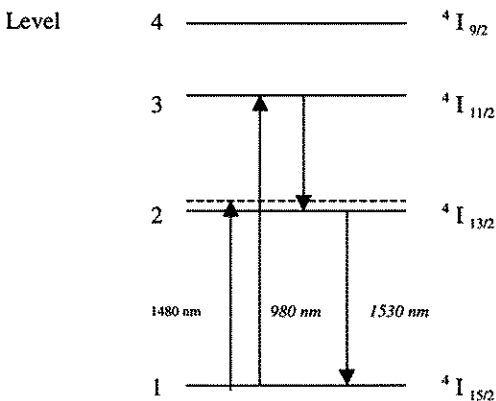


Fig. 1 Partial energy level diagram of Er^{+3} . Wavelengths shown in italics correspond to the optical transitions in silica. The 1480 nm transition corresponds to a pump scheme for ZBLAN (section III). Solid arrows refer to radiative transitions, dotted arrows refer to non-radiative transitions.

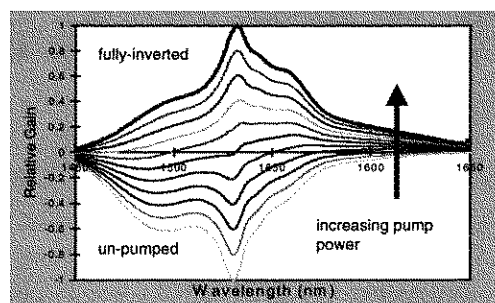


Fig. 2 Gain spectrum from an Er-doped fiber. Bottom-most curve represents complete absorption, while the top-most curve represents 100% emission (i.e. total inversion).

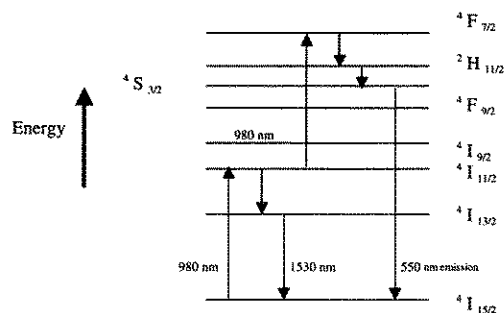


Fig. 3 Illustration of the excited state absorption process in Er^{+3} .

り、そのための反転状態の最適化が重要となる。光ファイバでの利得は比較的簡単に、次の式で表すことができる。

$$G(\lambda) = L[(g^*(\lambda) + \alpha(\lambda))n_2 - \alpha(\lambda)]$$

ここで、 G =利得 (dB), λ =波長, L =光ファイバ長, g^* =完全な反転分布状態での利得係数 (dB/km), α =損失係数 (dB/km), n_2 =平均反転分布パラメータである。

EDFA では有用でない利得過程がいくつも有り、最も良く知られているのは ESA (Excited State Absorption, 励起準位吸収) とアップコンバージョンである。 Er^{+3} に伴う ESA 過程を Fig. 3 に示す。ESA では単純に励起されたイオンが励起状態から準安定状態へ無輻射遷移する前に、第 2 の 980 nm フォトンの吸収を伴う。この過程は τ_{32} が比較的長い場合に増長さ

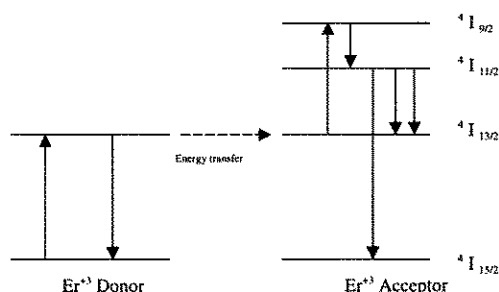


Fig. 4 Illustration of the up-conversion process.

れる。一方アップコンバージョンは、Er イオン間での無輻射のエネルギー移動が生じるような、隣接する Er イオン間の距離が比較的短い場合に生じる過程である。Er のアップコンバージョンは Fig. 4 に示すような二光子過程として表わせる。Er ドナーイオンが遷移し、Er アクセプターイオンを $^4\text{I}_{9/2}$ 準位に励起させることでエネルギーのやり取りが生じる。励起されたアクセプターイオンは非常に早く $^4\text{I}_{11/2}$ 準位に遷移すると一般に考えられている。そして、そのイオンは $^4\text{I}_{13/2}$ 準位に遷移する確率が最も高い。しかし、およそ $1/10^4$ 個のイオンは 980 nm フォトンの発光を伴い、 $^4\text{I}_{11/2}$ 準位から直接基底状態へ崩壊する。アップコンバージョンは光増幅過程にとって非常に有害で、数%の Er イオンクラスターの存在が致命的となる。

このため、Er イオン濃度の最大値を見極めることがしばしば重要となる。そうすれば、EDFA の単位長さ当たり最大の増幅が得られる。勿論、ホスト材料の特性は Er イオンの溶解性や非クラスター化濃度の限界に非常に大きく影響する。

3. ホストガラスの効果—Er 増幅

前述したように、ホスト材料の特性は Er の蛍光や吸収スペクトルに多大な影響を与え、利得スペクトル (Fig. 2) の形状や広がり大きく

く変化させる。この章では、比較的単純な多成分系ガラスにおける組成変化の Er^{+3} の $1.5\ \mu\text{m}$ 発光帯に対する影響について述べる。例えば、 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系ガラスでは、 $1.5\ \mu\text{m}$ 発光帯の細部は Na/Al の比と共に大きく変化する (Fig. 5)。この図で $N^* = \text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ である。

N^* の減少に従い、発光帯のピークが低エネルギーから高エネルギーへ明らかにシフトしていることと、FWHM が増加していることは非常に興味深い。このシフトは $^4\text{I}_{13/2}$ 遷移の高いシュタルク単位からの遷移確率の増加に起因し、高エネルギー側での発光強度の増加に繋がっている可能性がある。液体窒素温度等で測定すれば未解明の機構を解明する手がかりを得られるであろう。ともかく、 $N^* > 0.5$ でのガラスのスペクトルとタイプⅢの光ファイバ (Ⅳ章参照) との類似性から判断すれば、 Er ドープシリカの発光スペクトルはアルミナが制御していることになる。

比較的単純なガラス系における他の Er 発光の例を Fig. 6 に示す。これらは $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系ガラスで、 $C^* = \text{CaO}/(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ である。ここでも、 Er 発光は Fig. 5 の N^* 依存性と同様な C^* 依存性を示す。また、アルミナ

と置換物との量の比が等しい場合 ($C^* = 0.65$ と $N^* = 0.65$ との比較)、 Ca 含有ガラスは Na 含有ガラスより広帯域の $1.5\ \mu\text{m}$ 発光を示す。これも Na - と Ca - のアルミノシリケート系ガラス構造の相違を反映しており、結果的に Er の遷移確率に影響を与えているのであろう。

$\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系ガラスでのホウ素の影響を Fig. 7 に示す。 $B^* = \text{B}_2\text{O}_3/(\text{B}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ である。ここでも、広帯域スペクトルはアルミナ側に寄っている。Fig. 7 のスペクトルは明らかに Er^{+3} 発光強度に対するホウ酸塩

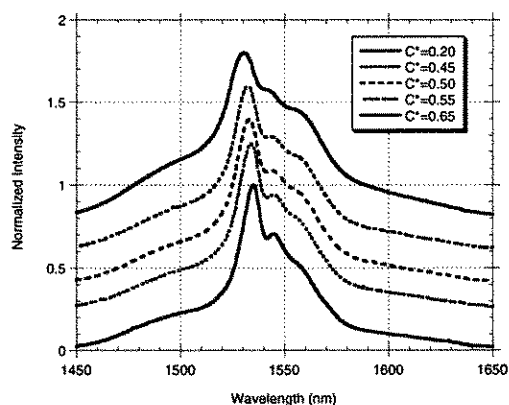


Fig. 6 Normalized fluorescence intensity of a series of Er -doped calcium aluminosilicate glasses. All glasses contain 50 mol% silica.

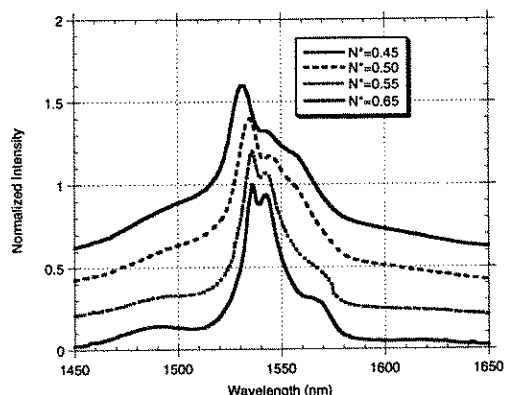


Fig. 5 Normalized fluorescence intensity of a series of Er -doped sodium aluminosilicate glasses. All glasses contain 50 mol% silica.

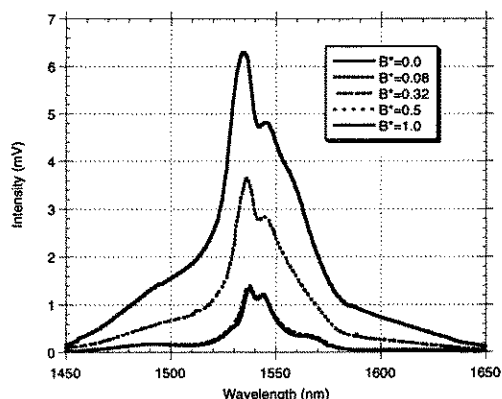


Fig. 7 Absolute fluorescence intensity of a series of Er -doped sodium boro-aluminosilicate glasses. All glasses contain 50 mol% silica.

の強い影響を示している。 $1.5\ \mu\text{m}$ 発光の減少は Er イオンと高いフォノンエネルギーをもつホウ酸多面体との間の電子-フォノン結合と関連している。この過程のため励起状態と上位レーザー準位との間 ($^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 遷移) の無輻射遷移速度は比較的早くなる³⁾。残念ながら、この現象は、励起電子のエネルギーがガラスネットワーク中のホウ酸の結合に移動するため、 $1.5\ \mu\text{m}$ 発光効率に重大な悪影響を与えるであろう。このため、ホウ酸塩の近傍の Er イオンが $1.5\ \mu\text{m}$ で発光しにくくなると考えられる。更に、ホウ酸多面体近傍に多く存在する水酸基イオンも Er の $^4I_{13/2}$ 準位からガラスの B-OH 結合へのエネルギー移動を補助すると考えられている。

$1.5\ \mu\text{m}$ 発光のために最も広く望まれた非シリカ系ホストガラスは多分、重金属フッ化物ガラス⁴⁾とテルライトガラスである。フッ化物とテルライトガラスはシリカガラスと比較して大幅に低いフォノンエネルギーを示し、結果的に励起状態と上位準位との間の無輻射遷移速度が変化する。重金属フッ化物ガラスの τ_{32} は長くなり、かなりの量の ESA を生じることになる。このため、 $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}_3$ ガラス (ZBLAN) のような Er 添加フッ化物ガラスは $1480\ \text{nm}$ レーザーを用いて直接上位集合体へ励起することが効果的となる。テルライトガラスは一般的にシリカや重金属フッ化物ガラスと比較して中間的なフォノンエネルギーを持っており³⁾、増幅傾きのない増幅器として Er の理想的なホスト材料かも知れない⁵⁾。

Er の発光スペクトルの詳細は多様な組成に依存しているが、ZBLAN とテルライトベースの Er ドープファイバの代表的なスペクトルを Fig. 8 に示す。これらの 2 つのスペクトルからはこれらのガラスでシリカガラスと比較してかなり広い発光が得られることがわかる。しかし、これらのガラスは大きな屈折率を示し、比較的耐久性に乏しく、熱膨張係数が大きく、比較的小さい⁶⁾等の欠点を有する。従って、既存

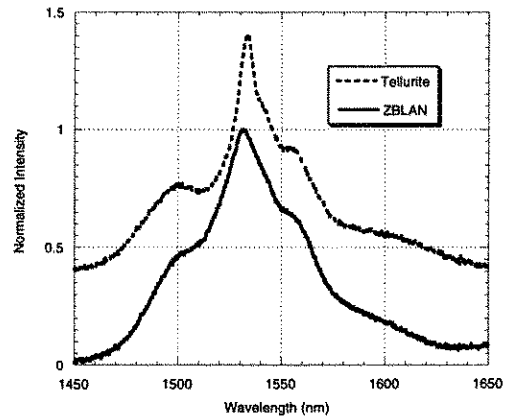


Fig. 8 Normalized fluorescence intensities from Er-doped tellurite and fluoride (ZBLAN) fibers.

の光ファイバ加工技術や融着技術をそのまま適用することはできない。実用に際しても注意を要する。

4. 最近の Er-ドープファイバ製品

ZBLAN やテルライトガラスのような材料は、増幅帯域増加のための Er 増幅器用として興味深い、実用性の観点からはこれらの材料を使いこなすことが更に重要な課題となる。Hall によると⁷⁾、次世代の長距離用 Er 添加ファイバ増幅器は以下の基準を満たす必要がある。

Gain	23-26 dB (45-50 dB internal gain)
Gain Bandwidth	$\geq 32\ \text{nm}$
Gain Flatness	$\leq 1\ \text{dB}$
Output Power	$\geq 5\ \text{dBm/ch}$ ($40 \times 100\ \text{GHz} \Rightarrow 21\ \text{dBm}$)
Noise Figure	$\leq 6\ \text{dB}$
Reliability	$\leq 2000\ \text{FIT}$ over 25 year lifetime
Dynamic Gain Tilt	$\leq 1\ \text{dB}$ for 10 dB change in gain
Heat Dissipation	$\leq 30\ \text{Watt/pump}$ at 70°C
Cost	Increasingly low cost

この表に示した基準の中で、テルライトと ZBLAN にとって最も厳しいのは信頼性と利得と価格であろう。これらの材料にとってもうひとつ潜在的な問題はフォトダークニング、つまり、ポンプ光の放射による光吸収欠陥の生成で

ある。

EDFA の95%以上は $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-SiO}_2$ 系ホストガラスに基づいたものが現状で使われている。この系では、屈折率上昇用の GeO_2 と SiO_2 はガラス中で似た構造を示すことは良く知られている。また、アルミナはガラス中で Er イオンが分散する（クラスタにならない）のを助ける有益なコードパントである。これにより、有害なアップコンバージョン効果を避けながら、Er の濃度を上げることが可能になる。アルミナがない場合は、非常に少ない濃度の Er でもアップコンバージョンが生じる。更に、2つのピークから成る $1.5\ \mu\text{m}$ の発光と吸収の帯域は非常に狭い。従って、アルミナ添加によりシリカ系ガラスホストは様々なスペクトルの変化を生じるが、その中で最も重要なのは発光と吸収スペクトルの広帯域化であろう。しかし、アルミナ濃度の増加に従い発光と吸収ピークの波長が短波長側に移動し、長波長側の強度が減少する⁸⁾。Er 添加 Al:Ge:Si 系ファイバには3つの基本形があり、それらをアルミナ濃度の関数として、下記の表に概略的に分類する。

Type I	0.7-1.2 wt% Al_2O_3
Type II	2.0-4.5
Type III	> 4.5

$1.5\ \mu\text{m}$ 発光帯の幅と詳細構造に対するアルミナの影響は約 5-6 wt% Al_2O_3 以上の濃度で潜在的に減少する。結局、これを利用する技術者にとって問題なのは利得曲線の形状である。約 980 nm 励起による3種のシリカ系ファイバの利得曲線を Fig. 9 に示す。ここで、各々のスペクトルは 1528 と 1560 nm での殆ど同じ利得となるように、ファイバの長さを調節している。アルミナ濃度を 2.1 から 4.7 wt% に変えた場合の方が、4.7 から 8.3 wt% に変えた場合より、利得曲線の変化は明らかに大きい。光ファイバコアのホストガラスの安定性はアルミナの量の増加に伴って減少するから、広く平坦な利

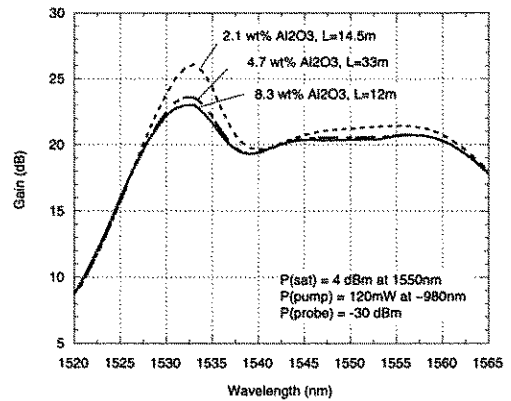


Fig. 9 Gain curves of Er-doped Al-Ge-Si fibers. Erbium concentration varies by a factor of ca. 2.

得に対する要求と、増幅しない場合の低損失性、単位長さ当りの利得、加工性などの要求とのバランスをとることが重要となる。勿論、長さ当りの利得は Er の濃度、パッシブ損失、アップコンバージョン、ESA そして ASE (Amplified Spontaneous Emission) に依存している⁸⁾。

I～III型のファイバは主に chemical vapor deposition (CVD)、焼結そして通常の光ファイバ線引きにより製造される。CVD 工程で、原料はバーナーにより導入され、燃焼してロッド上またはチューブ内に堆積する。そして、導波路プリフォームが形成される。Outside vapor deposition 工程 (OVD) のプリフォームは一般にポーラスなスートロッドからなり、次に空孔のない透明なアモルファス体に焼結される。Inside vapor deposition 工程 (IVD) のプリフォームはチューブ（最終的にクラッドになる）中にコア材料を堆積することにより作成される。コア材料の堆積の後で、チューブは潰され、軸に沿った空間は消滅する。コアとクラッドから成る OVD 又は IVD プリフォームは次に線引き炉を用いて光ファイバに線引きされる。光ファイバ製造工程の詳細は他の文献を参照されたい^{9),10)}。

5. 最新の増幅帯域

この解説の多くは広帯域 EDFA に割いてきたが、伝送帯域をさらに拡大することに対する興味が広まっている。Er 増幅器は分割帯域構成により、約 1530 nm～1610 nm の伝送帯域を受け持っている¹⁰⁾。帯域幅の革命は爆発的に普及したインターネットと他のデータ伝送によって駆り立てられ、通信業者に自社の通信システムのビットレートを最大化するというプレッシャーを与え続けている。

Er 増幅器の利得帯域以外で新しい伝送帯域を見つけようとする思索・研究が多くなされてきた。この新しい帯域の利用と光ファイバの増設による Er 帯域の再利用とでどちらがメリットが多いか、特に長距離伝送では意見は2つに分かれている。しかし、Dense WDM 技術を考慮すれば、大都市部においてはこれらの新しい帯域に対する興味は強いものとなる。

これらの新しい帯域での増幅が増幅器の設計技師に対し EDFA より更に挑戦的な問題を提供するのは明らかである。Er 増幅器の利得帯域がシリカ光ファイバの低損失帯域とが完全に重なり合うということは驚くべきことである。そして、EDFA の成功の決定的な要因は、たとえホストガラスがシリカ系であっても、Er が 1530 nm 遷移から 100% の蛍光効率を示すことである。従って、新しい伝送帯域を開くという挑戦はより損失の大きい波長帯域でより多くの利得を得ることを意味する。更に、十分な蛍光効率を得るためにはフォノンを制御したガラスを開発する必要が生じる。この理由により、10 年間 EDFA の影に隠れていたラマン増幅器¹¹⁾と半導体増幅器¹²⁾が本当の代替候補として復活して来た。しかし、ここでは最新の希土類ベース増幅器についてレビューする。

低損失帯域

シリカの低損失帯域は 1300 nm から 1700 nm に及ぶと言うことができる。従って、1530～1610 nm の Er の帯域はその波長帯域の

約 20% しかカバーしていない。しかし、伝送損失や曲げ損失を考慮に入れると、この狭い帯域は全長距離容量の 50% 近くをカバーしていることになる¹³⁾。分岐損失が伝送損失の主要因となる大都市部では、新しい帯域はより有用であろう。しかし、大都市事業ではコストが主要因となる。

新しい帯域を満足させうる希土類イオンとしては 1300～1400 nm 帯での Pr^{3+} と Nd^{3+} 、また、1400～1530 nm と 1650～2000 nm の 2 つの増幅帯域を持つ Tm^{3+} がある。最後の帯域は現在の長距離伝送ファイバの波長帯域外にある。しかし、少なくとも部分的には大都市の光ファイバでは将来適用できる可能性がある。

Pr ドープ増幅器

1987 年の EDFA の大発見以前から、この帯域での効率的な増幅は 10 年以上にわたって研究者の目標であった。実際その頃は EDFA は使えない波長の増幅器と考えられていた。これは適用した光ファイバが長距離ファイバの零分散波長 (1290 nm) での伝送用に設計されたものであったからである。従って、EDFA の成功と分散補償技術の発達により 1550 nm 帯域の実用性が特に強調されるようになったのである。

現在、Pr ドープ・ファイバ増幅器は 1300 nm 帯での最も有望な増幅器となった。しかし、この遷移の量子効率は、Fig. 10 に示す好ましくない無輻射緩和が存在するため、ホストガラスの均一性に大きく依存する。Pr ドープフッ化物光ファイバの効率的な増幅は既に 1991 年に報告されている¹⁴⁾。しかし、増幅効率 (約 0.2 dB/mW) は EDFA と比較し非常に小さい。しかも、増幅のピークは光ファイバの零分散波長 (λ_0) より長い。但し Dense WDM ではチャンネル間のクロストークが問題となるので、 λ_0 近傍での増幅は好ましくない。それでも、増幅チャンネルは普通直ぐに飽和するので、安価なポンプ光源が将来開発されれば、それは大都市地区で有用となりうる。

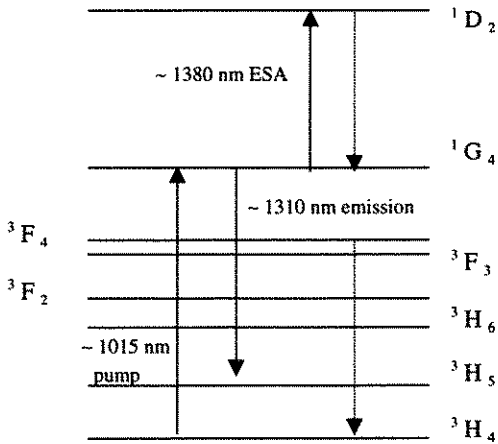


Fig. 10 Partial energy level diagram for Pr^{3+} . Solid arrows refer to radiative transitions, dotted arrows refer to non-radiative transitions.

フッ化物ホストの増幅器開発の他に、量子効率向上のためにフォノンエネルギーの極めて低いカルコゲナイトガラスを開発することを目的とした広範囲な研究がなされてきた¹⁵⁾。その進歩はファイバ加工が難しいため非常に遅かったが、最近いくつかのグループがその測定に成功したと報告している^{16),17)}。しかし、この進歩が WDM で有用かどうかは明確でない。なぜなら最も重要な要素は増幅係数というより、最終的な効率だからである。

Nd ドープ増幅器

Nd ドープ・ガラスには Fig. 11 に示すように、 $4\text{F}_{3/2}$ からの波長約 930 nm と 1060 nm と 1340 nm の 3 つの転移がある。最後の転移は 1300 nm 付近での増幅の可能性を示しているが、主に信号光・ESA と 1060 nm での更に高効率な転移による自己飽和の 2 つの要因により阻害される。後の要因は洗練されたフィルタ技術¹⁸⁾により管理できるが、信号 ESA は主に利得ピークを蛍光ピークの赤色側へ移動させる。シリカホストの場合はこれが適した利得を 1380 nm と 1400 nm の間に追いつき、 λ_0 での増幅としては IR 側に寄りすぎる。しかし、

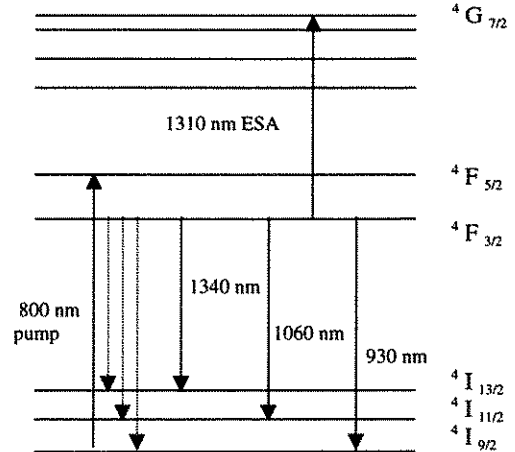


Fig. 11 Partial energy level diagram for Nd^{3+} . Solid arrows refer to radiative transitions, dotted arrows refer to non-radiative transitions. Transition wavelengths are approximate.

Dense WDM システムではその様な増幅器は Pr-と Tm ドープフッ化物ガラスで可能な増幅の間ギャップを埋める可能性がある。効果的な利得ピークを λ_0 に戻すという取り組みの中で、シリカ以外のホストガラスについて研究されてきたが¹⁹⁾、1340 nm より短波長側に移動させることは非常に難しいことが解ってきた。従って、最近の研究はまた Pr ドープ材料に集中して来ている。この波長帯域での Nd^{3+} イオンへの興味は WDM 伝送への重点化により復活する可能性がある。

Tm ドープ増幅器

Tm は超広帯域増幅器への応用として興味深い、なぜなら、それは Er 増幅帯域のどちらかの側部での利得が望めるからである。Fig. 12 にその関連するエネルギー準位を示す。ここでも、1430–1530 nm 帯域ではフォノンエネルギーの低いホストが必要となるが、この長波長帯域ではシリカホストで充分である。他方、 3F_4 - 3H_4 遷移による短波長側の帯域にはいくつかの問題がある。まず、 $2.3\ \mu\text{m}$ で競合遷移があり、これはフォノンエネルギーの高いホストガラスの中では 3F_4 準位の急速な無輻射遷移に

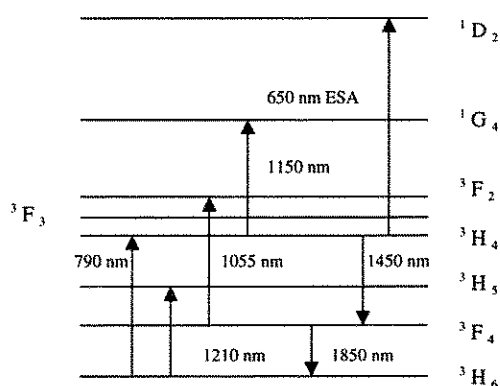


Fig. 12 Partial energy level diagram for Tm^{3+} . Transition wavelengths are host-dependent and approximate.

つながる。次に、下位準位での寿命が上位準位での寿命より長い（典型的には10倍）ため、本準位間の反転分布が形成できず、 $1.45\text{ }\mu\text{m}$ 帯の有効な増幅が実現できないという課題を有する。そしてTmドープファイバではESAによるフォトダークニングが生じやすい。その競合する遷移はフォノンエネルギーの低いホストを用いれば制御できる。約1msの寿命がフッ化物ホストで達成されている。この課題は Ho^{3+} 共添加によるエネルギー遷移、 1850 nm 帯自己レーザ発振及びアップコンバージョン励起により改善が検討されている。フォトダークニング²⁴⁾の問題は、論文等では言及されない場合もあるが、いまだに残っている。 Tm^{3+} 増幅器が生き残るためにはその効果を最小限に押さえることのできるホストガラスや的確な励起方法を発見する必要がある。

Tm^{3+} には 1600 nm から 2000 nm の間に広がる長波長遷移 ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ があるにもかかわらず、Tmドープ系は未だWDM増幅器の重要な候補とはなっていない。しかし、ファイバ長による損失増加が殆ど問題とならない大都市部では、この波長領域が重要になりうる。それはホストがシリカであっても良いということ²⁵⁾、非常に魅力的である。但し、フォノンエネルギーの低いホストが前段の増幅器として

好ましいことに変わりはない。

いくつもの希土類遷移により、確立されたEr利得帯域外での増幅器としての可能性が示されている。しかし、Er以外の希土類ドープ増幅器が使用されるかどうかは、長期信頼性とラマンや半導体増幅器と比較した時のそれらの相対的効率に依存しており、何にもましてコストが重要となる。

結 論

Erドープガラスが光増幅器として長距離伝送システムで広く用いられているのに対し、Dense WDM技術や大都市システムへの応用は、Er帯域の限界により、より挑戦的な課題となる。短距離への応用では光ファイバの損失の問題は少ないので、新しいガラス系が重要と成る可能性がある。実際、少なくともフッ化物とテルライトの2つのガラス系はAlドープ・ゲルマノシリケートと比較して $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 帯でより広い帯域を供給できることが示されている。活性イオンとしてPr又はNd又はTmを用いた新しい増幅帯域の拡張が試みられているが、更なる組成の探索と製造工程改良が必要であろう。そこでは信頼性、利得係数そしてコストが実用性に影響を与える。そして、多様な利得平坦化技術により伝統的なErドープファイバがより広帯域で有用となっていることも忘れてはならない。

謝 辞

著者はFig. 8のデータに関してJason DebenfortとTom VanSantに、Fig. 9に関してLisa Mooreに感謝します。

参考文献

- 1) W. J. Miniscalco, Chapter 2, p. 82, *Rare Earth Doped Fiber Lasers*, Edited by M. J. F. Digonnet,

- Marcel Dekker, Inc. New York, 1993.
- 2) A. Bjarklev, Section 3.1.4, pp. 39–40, *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications*, Artech House, Inc., Boston, 1993.
 - 3) Op. Cit., Miniscalco, pp. 36–37.
 - 4) B. Clesca et al.; *Opt. Fib. Tech.* 1, pp. 135–157, 1995.
 - 5) M. J. Yadlowsky, *Trends in Optics and Photonics*, Vol. 25, pp. 24–27, OSA, 1998.
 - 6) C. A. Angell, “Strong and Fragile Liquids,” *Relaxations in Complex Systems*, Edited by K. L. Ngai, G. B. Wright, National Technical Information Service, US Department of Commerce, pp. 3–11, 1984.
 - 7) D. W. Hall, “New Materials and Fibers for Erbium Amplifiers,” invited paper, presented at Optical Amplifiers and Their Applications Conference, sponsored by OSA, Vail, CO, July 27–29, 1998.
 - 8) E. Desurvire, *Erbium-Doped Amplifiers, Principles and Applications*, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1994.
 - 9) *Advances in Ceramics*, Vol. 2, *Physics of Fiber Optics*, Edited by B. Bendow and S. S. Mitra, The American Ceramic Society, Inc, Columbus, OH, 1981.
 - 10) Y. Sun et al.; *Proceedings ECOC 98*, Madrid, pp. 53–54, 1998.
 - 11) R. H. Stolen et al.; *Applied Phys Lett*, 22 [6], pp. 276–279, 1973.
 - 12) G. van den Hoven; *Proceedings ECOC 98*, Madrid, 1998.
 - 13) M. Yadlowsky, *OFC 99 Technical digest*, San Diego, paper WA1, 1999.
 - 14) Y. Ohishi et al.; *Optics Lett.*, 16 [22], pp. 1747–1749, 1991.
 - 15) D. W. Hewak et al.; *Electron. Lett.*, 29 [2], pp. 237–239, 1993.
 - 16) H. Tawarayama et al., *PDP-1, Optical Amp. and Their Applicatins Conf.*, Victoria, BC, Canada, July 23–27, 1997.
 - 17) M. Atushi et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 70 [10], pp. 1230–1232, 1997.
 - 18) M. Obra et al.; *Electron Lett.*, 27 [5], pp. 470–472, 1991.
 - 19) M. L. et al.; *IEEE Photonics Tech Lett.*, 2 [9], pp. 650–652, 1990.
 - 20) R. M. Percival et al.; *Electron. Lett.*, 28 [20], pp. 1866–68, 1992.
 - 21) R. M. Percival et al.; *Electron. Lett.*, 28 [20], pp. 1866–68, 1992.
 - 22) T. Komukai et al.; *Electron Lett.*, 28 [9], pp. 830–832, 1992.
 - 23) R. M. Percival et al.; *Electron. Lett.*, 30 [13], pp. 1057–1058, 1994.
 - 24) P. Laperle et al.; *Optics Lett.*, 20 [24], pp. 2484–2486, 1995.
 - 25) T. Yamamoto et al.; *Electronics Lett.*, 30 [3], pp. 220–221, 1994.