

光ファイバアンプの原理，開発の現状と展望

京都大学大学院人間・環境学研究科

田部 勢津久

”Principle, present status and prospects of optical fiber amplifiers”

Setsuhisa Tanabe

Graduate School of Human and
Environmental Studies, Kyoto University

以下の会話は再度，大学院生の A 君が B 先生のとこに訪ねたときの会話である。

A 君：B 先生，前回 [1] はお世話になりました。おかげでガラス材料における希土類の役割について，いいレポートが書いて，「優」もらいました。

B 先生：こちらこそ，前はせっかく話が佳境に入ったところで，途中で帰ってしまって申し訳ない。

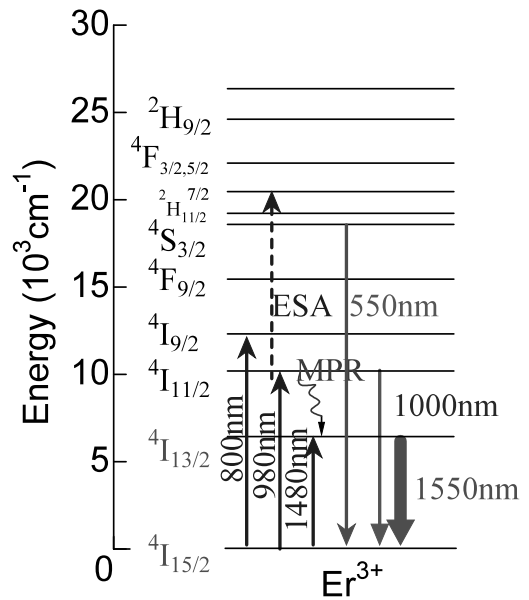
A：今日は，話の続きを聞きたいのですが，光増幅器って，エルビウム元素が活躍しているんでしたよね。

B：ああ。エルビウムドープファイバアンプ (EDFA) は代表的な光増幅器で，波長 1.55 μm あたりの C 帯や C+L 帯 (1.53~1.61 μm) の増幅器としては今のところ，多の追従を許さない，と言っていいだろう。

A：なぜですか？

B：まず，光増幅器の構成と動作原理について，見てみよう。この図 (図 1) を見てくれ。

A：ええと，EDF エルビウムドープファイ



Energy level of Er^{3+} ion.

Er-Doped Fiber Amplifier (EDFA)

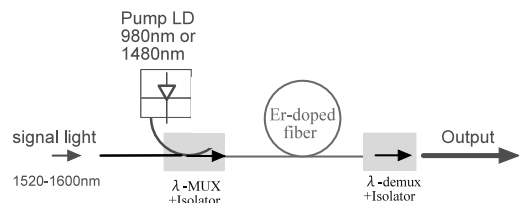


図 1 EDFA の構成と Er のエネルギー準位

〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町

TEL 075-753-6832

FAX 075-753-6694

E-mail: stanabe@gls.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

http://www.h.kyoto-u.ac.jp/jinkan/third/342/tanabe

バに半導体レーザがつながっていて、このMUXって何ですか？

B: 合波器、別のファイバからやってきた波長の異なる 2 種類の光を一本のファイバに通すものだ。ここでは、0.98 μm や 1.48 μm の励起用レーザ光と信号光である 1.55 μm 帯の光を合波するのに必要だ。

A: エネルギー準位 (図 1 右) でいうこの上向き矢印が励起光ですね。

B: この図は EDF 中の Er³⁺ イオンのエネルギー準位で縦軸がエネルギーの高さになっている。この準位を構成するのは内殻の 11 ケの 4 f 電子だ。この⁴I_{15/2} という記号は知っているね。

A: はい、Russel-Saunders 表記とって、この場合 7 つの 4 f 電子軌道に收容されている複数の電子によって構成される全体の電子配置を表現しています。左上がスピン多重度 2S+1, 真ん中のアルファベットが軌道角運動量に対応、右下の数字が全量子数 J です。

B: ご名答。では、Er³⁺ イオンの基底状態がどうしてこうなるか説明して御覧。

A: 7 つの電子軌道に 11 ケの電子を安定に收容する際には、Hund 則に従って、まずスピンの平行に一つずつ別々の軌道に、7 つを越えたら、Pauli の排他原理を守って、逆向きスピンの 2 ケ目の電子を角運動量が最大になるように入れていく。結局磁気量子数が、+3, +2, +1, 0 の軌道に 1 組ずつの電子対が、-1, -2, -3 の軌道に 1 組ずつの電子対が收容されます。角運動量子数は、3+2+1=6, 整数 0, 1, 2, 3, ... に対して、S, P, D, F, G, H, I ということ、I を使い、スピンは 1/2×3=3/2, J は電子数が more than half なので、L+S=6+3/2=15/2 で、できあがり。

B: さすがだ。同じ S を持っている電子配置は、J=L+S, ..., L, ..., L-S まで、スピン軌道相互作用で 2S+1 通りに分裂するので、⁴I_{15/2} で示される準位は 4 種類ある。各準位のエネルギーの高さは基底状態をゼロ基準として表し、Er

の場合、下から 6500 cm⁻¹, 10200 cm⁻¹, 12500 cm⁻¹ のところに、第一、第二、第三励起準位があり、これが同じ⁴I₇ の J=13/2, 11/2, 9/2 に相当する。

A: ⁴I_{9/2} って、Nd³⁺ イオンの基底状態と同じですよ。

B: そのとおり。Nd は YAG レーザや大出力ガラスレーザで重要な活性元素だよ。4 f 電子が 3 ケある場合はどうなるか考えて御覧。Er³⁺ と同じ表記の準位が必ずある。

A: 偶然ですか？

B: いや、一般に 4 f 電子数が N ケと 14-N ケのイオンは、必ず対応する^{2S+1}L_J が存在し、エネルギー準位の高さの順番だけ逆転する。7 つ以下では、J の小さい方が安定で、7 つ以上ではその逆だ。

A: そういえばこの図 (図 2 [2]) を見ると、Ce³⁺ と Yb³⁺, Pr³⁺ と Tm³⁺, Sm³⁺ と Dy³⁺, Eu³⁺ と Tb³⁺ はそんな関係になっていますね。

B: だからランタニドのエネルギー準位は複雑そうだけど、合理的にみると覚えやすい。例

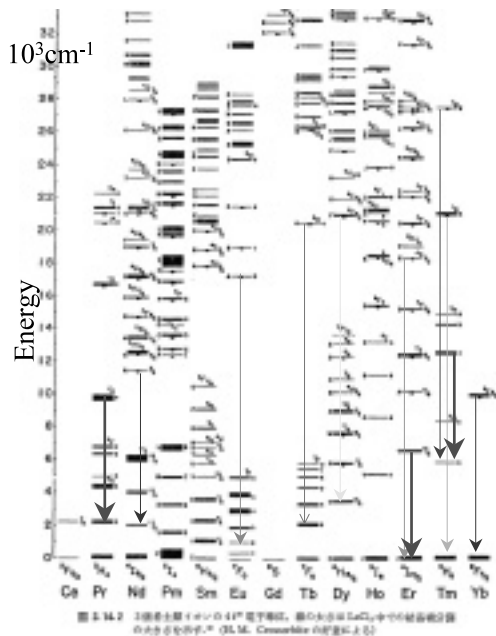


図2 3 価ランタニドイオンの 4 f 電子エネルギー準位 [文献 2 に筆者加筆]

例えば 4 f 電子数が奇数だと、RS 表記の右下の J は、全ての単位に対して必ず半整数だし、電子数が偶数だと J は必ず整数になる。J の大きさによって配位子場の対称性による Stark 分裂の本数が変わり、スペクトルの形が影響を受ける。

A: 本当だ、今まで気付きませんでした。でも Nd^{3+} と Er^{3+} では、 ${}^4\text{I}_j$ 準位間のエネルギー幅が大分違いますね。

B: Nd は原子番号は 60 番, Er は 68 番で、核電荷が大分違う。

A: これ、Nd では ${}^4\text{I}_j$ 準位は、上の ${}^4\text{F}_{3/2}$ 始準位からの 0.9 μm , 1.06 μm , 1.33 μm など発光遷移の終端準位になっていますね。

B: この準位間の狭さが早い無輻射緩和を促し、Nd の場合、1.06 μm や 1.33 μm 遷移が 4 準位系レーザとして動作しやすい理由にもつながっている。

A: Er は 3 準位系なんですけど。

B: うん昔のレーザ物理の教科書 [3] には、「レーザ発振のためには励起始準位と終端準位の間で反転分布（負温度状態、あくまで Boltzmann 分布の前提で）の成立が必要で、基底状態が終端準位となる 3 準位系より、4 準位系が有利である。」と書いてあるけどね。

A: ガラスファイバでは、常識が覆ったわけですね。コア径が 5 μm 位だと、励起光密度は、レーザビーム径が 1 mm の時の 4 万倍か。

B: もちろん励起用半導体レーザのファイバ出力が現在では高い効率で得られることや、シングルモードファイバのアラインメントを確実に出来る精密なフェルルール材料の開発など、周辺技術の恩恵もたくさん受けている。いずれにしてもガラス光ファイバほど綺麗な導波路構造が作りやすい材料はないのではないかな。

A: 研究室の先輩から、金太郎鮎と同じ原理だと習いました。ホーリーファイバやフォトリック結晶ファイバのように、蓮根の断面みたいな複雑な構造も写真で見ることがあります。

B: あれはファイバの非線形性や構造分散を制御したり、カットオフ波長をずっと短くして、広い波長範囲で単一モード動作したりするのに有効な構造なんだ。少し脱線してきたので話を元に戻そう。先程の図で合波器で EDF に入力された励起レーザ光はファイバコア中の Er イオンに吸収されると同時に 4 f 電子を励起状態にする。1.48 μm で励起した場合は、直接 1.5 μm 発光遷移の始準位 ${}^4\text{I}_{13/2}$ の中のサブ準位の上の Stark 成分を、0.98 μm の場合は一つ上の ${}^4\text{I}_{11/2}$ 準位を励起することになる。後者の場合、Er 濃度が薄ければシリカガラスでは 99% 以上の確率で、すぐに ${}^4\text{I}_{13/2}$ 準位へ緩和する。

A: そうでない場合もあるわけですね。

B: Er 濃度が薄い場合、ガラスホストのフォノンエネルギーが低ければ、約 1 μm で発光して直接基底状態に輻射緩和する確率が一番高くなる。この場合、始準位は効率よくポピュレートされず、反転分布形成は効率が悪い。

A: シリカガラスは Si-O の伸縮振動エネルギーが 1000 cm^{-1} 程度ですよ。えっと ${}^4\text{I}_{11/2}$ と ${}^4\text{I}_{13/2}$ 準位のギャップは 3300 cm^{-1} 位だからフォノン 3 ケ程度で多フォノン緩和が起こる。

B: そう、この準位間の輻射遷移は、Er: YAG やフッ化物ファイバなどで、2.9 μm レーザメスとして利用できる。これはホスト材料のフォノンエネルギーがシリカより小さいので、緩和に必要なフォノン数が大きくなるため、多フォノン緩和確率が小さくなり、結果として輻射量子効率が高くなるからだ。実はしかし ${}^4\text{I}_{11/2}$ 準位からの自然放出係数は、基底準位への 1 μm 遷移の方が大きい。

A: ある程度フォノンエネルギーが大きいガラスの方が EDFA としては有利なのですね。でも C 社はフッ化物 EDFA を商品化 [4] していますよね。

B: うん、普通低フォノンエネルギーホスト中だと緩和確率が小さくなって ${}^4\text{I}_{11/2}$ 準位の寿命が長いので、ここから上の準位に励起されてしまい、550 nm の緑で光るというアップコンバー

ジョン蛍光が観測される (図 1 右)。この傾向は Er 濃度が高いともっと強くなる。これを避ける方法 [4] は長くなるので省略するが、シリカ系 EDFA に比べ、フッ化物 EDFA は利得帯域が広いので、WDM でたくさんの波長を増幅するのに有利だと考えられる。同じ理由で開発されたのが、テルライトガラス [5-7] や酸化ビスマス系ガラス [8-10] だ。

A: 広帯域アンプ材料のテーマは面白そうですね。ガラス中の Er の局所構造配位子場とエネルギー準位内の Stark 分裂や不均質広がりとの関係がわかれば、いいのに。

B: うん、ガラス科学としても興味深い。ところでデバイス構造に戻るが、EDF の出口にある矢印はアイソレータなんだがこの意味は分かるかい？

A: YIG (イットリウム鉄ガーネット) のファラデー回転を利用したもので、レーザー光の逆進を防ぐんですね。

B: これがないと励起光を入れただけで EDF 中で発振した光が何回も往復して、自己発振レーザになることがある。特に高屈折率ガラス EDF ではシリカファイバとの屈折率の違いから、融着接続端面での反射率が高くなり、起こりやすい。

A: そうかアンプの目的はあくまで入力信号光の増幅ですから、信号波長以外でレーザー発振されては困るんですね。

B: これも技術的には傾斜角をつけて融着接続することで回避している。

A: 出口の融着点での反射光がコアから逃げれば、逆進する光はないと。

B: 現実にはシリカだけからなるデバイスでも、接続面での反射戻り光は無視できないので、いずれにしてもアイソレータは必須だ。

A: アンプの原理はレーザと共通だけど、ファイバレーザとデバイス構成は違うんですね。ところで、前回先生に貰ったこの図 (図 3) なんですけど、WDM で使用波長を拡充するのに他の希土類が使えるって本当ですか？

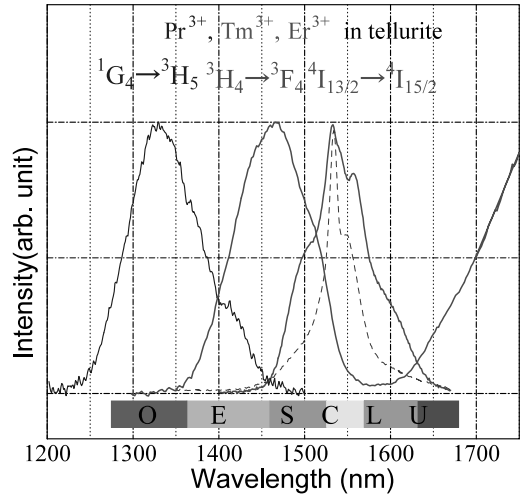


図3 通信波長帯と Pr³⁺, Tm³⁺, Er³⁺ イオンの発光スペクトル

B: 本当だ。図 4 に帯域とスペクトルも示す。希土類イオンの発光遷移波長を調べてみると色々な波長で候補元素がある。例えば 1.3 μm 帯には 3 つの候補 (図 5) があるがこのうち Pr³⁺ を利用した PDFA は 90 年代初頭に NTT によって実用化された [11]。ただし、これはシリカガラスがホストでは全くダメで、フッ化物ファイバが用いられる [12]。

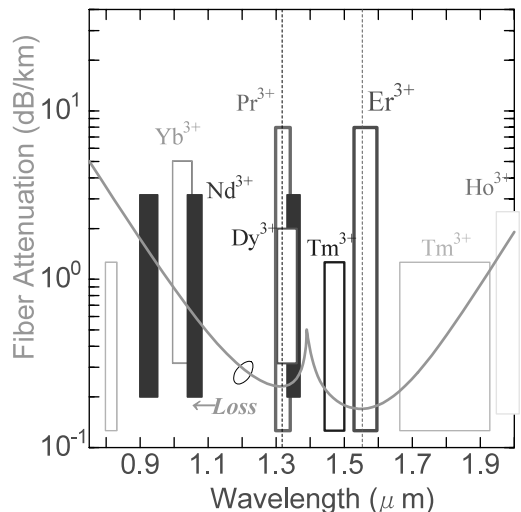


図 4 光ファイバの損失スペクトルと希土類イオンの発光バンド

A: シリカでは量子効率が低いんですね。Dy³⁺ はなぜダメなんでしょう？

B：Pr³⁺がシリカでだめな理由と似ているんだが、始準位のエネルギーギャップがもっと狭いので、フッ化物でも不十分で、もっとフォノンエネルギーの低いカルコゲナイドでやっとならんだ [13] が、実用化されていない。

A：カルコゲナイドファイバもありますよね。でももっと長波長の赤外パワー伝送用とかセンサー用途だけで、アンプに使う波長では損失がまだ高くなるのかな。Nd³⁺はシリカやリン酸塩ガラスでも量子効率が高いはずですが。

B：その通り、1.33 μm 遷移の発光始準位は、1.06 μm レーザと共通だしね。ただこの準位からのブランチ比は 5 分の一以下だし、何よりも、同じ準位からの励起状態吸収 (ESA) がちょうど 1.3 μm 付近に存在している (図 5 [14]) ので、いわゆるシングルモードファイバの分散がゼロになる、昔の第 2 通信波長といわれる、1.31 μm を中心とする O バンド (original の意) の短波長側で利得がとれないんだ [15]。

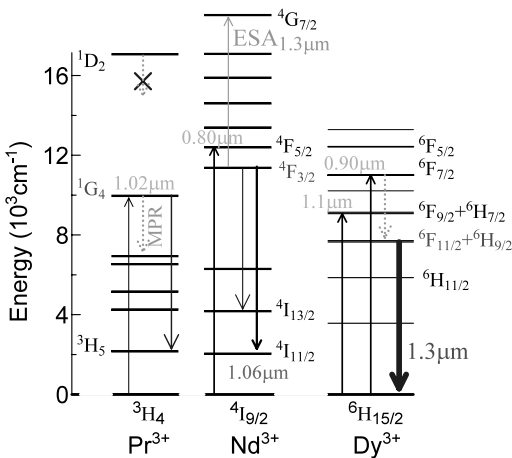


Fig. 12 Energy level of pr³⁺, Nd³⁺ and Dy³⁺ ion.

図 5 Pr³⁺, Nd³⁺, Dy³⁺ イオンのエネルギーと 1.3 μm 遷移

A：そういえば EDFA が長波長側の U バンドで利得がとれない理由も ESA だ [16] と読んだことがあります。発光始準位の ⁴I_{13/2} から ⁴I_{9/2} への吸収遷移波長が 1.6 μm 強なんですよ。

B：そのとおり。荒っぽい説明だが、単純な 2 準位系で増幅媒質の利得係数 $g(\lambda)$ を励起準位の電子占有率 n を使って表すと、

$$g(\lambda) = n_u \sigma_{em}(\lambda) - n_l \sigma_a(\lambda)$$

となる、ここで各波長での発光断面積 $\sigma_{em}(\lambda)$ と吸収断面積 $\sigma_a(\lambda)$ の大小関係は波長によって変わるが、各準位の Stark 分裂と McCumber の関係でおおよそ重心波長より長波長側で $\sigma_{em}(\lambda) > \sigma_a(\lambda)$ となり、実は上準位の反転分布係数が 50% を越えていなくても、利得がとれる波長域が存在できるんだ (擬 4 準位系)。ところが実際は上にも準位があり、ESA が存在すると、

$$g(\lambda) = n_u \{ \sigma_{em}(\lambda) - \sigma_{ESA}(\lambda) \} - n_l \sigma_a(\lambda)$$

と第 2 項を考慮する必要がある、 $\sigma_{em}(\lambda) < \sigma_{ESA}(\lambda)$ となる 1.6 μm 以上の波長では、いくら励起光を強くして反転分布係数を大きくしても、利得がとれない。もちろん、このあたりの波長では $\sigma_a(\lambda)$ は十分小さく無視できるけれども、だ。

A：Er は U バンドでの長波長側 ESA が原因で、Nd は O バンドの短波長側の ESA が原因で、それぞれ、1.6 μm 以上、1.31 μm 以下で利得がとれない、というわけですね。

B：まあそんなところだ。波長がはずれると希土類アンプには限界がある。

A：U バンドアンプの候補はないんですか？

B：希土類の中では Tm³⁺ が一番有力だろう [17]。第一励起準位から、基底への 3 準位系遷移がある (図 6)。

A：1.4~1.5 μm 帯の S バンド用アンプでも実用化されています [18] よね。波長が長すぎませんか？これたしか 1.9 μm レーザの遷移ですよ。

B：だから NTT の提唱した方式は、クラッドに Tb ドープガラスを使い、長波長側の ASE を抑制して、短波長側の U バンドで増幅利得を可能にした [17]。

A：考えますね。クラッドじゃなくてコアに Tm と共ドープしたらダメなんですか？

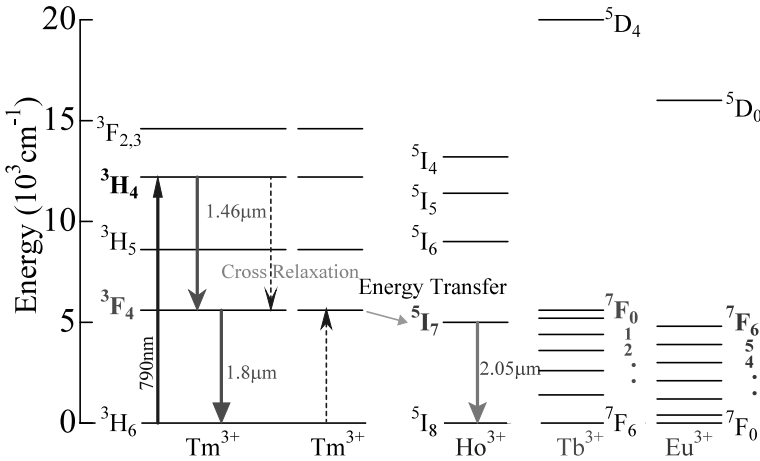


図6 Tm³⁺の重要光学遷移と他の希土類のエネルギー準位

B : イオン間相互作用で始準位³F₄自身がquenchされてしまうので、量子効率が低下する。実はこうすると反転分布係数が向上するので、Sバンドアンプとしては好都合なんだ。共ドープメントとしてはHoのほうがもっといい[19-21]。

A : 使う波長によって逆の効果が出るのはなぜですか？

B : この図(図6)を見て御覧。Sバンドの増幅遷移はこの第3励起³H₄準位から、先程の³F₄準位への遷移だ。ところがこの準位の寿

命はErほどではないが長すぎて、直接始準位を0.8μmレーザで励起しても反転分布を形成しづらい。Sバンド増幅利得を上げるのであれば、先程のgの考えからいって、なるべく下準位の占有率を下げるのが有利だろう。

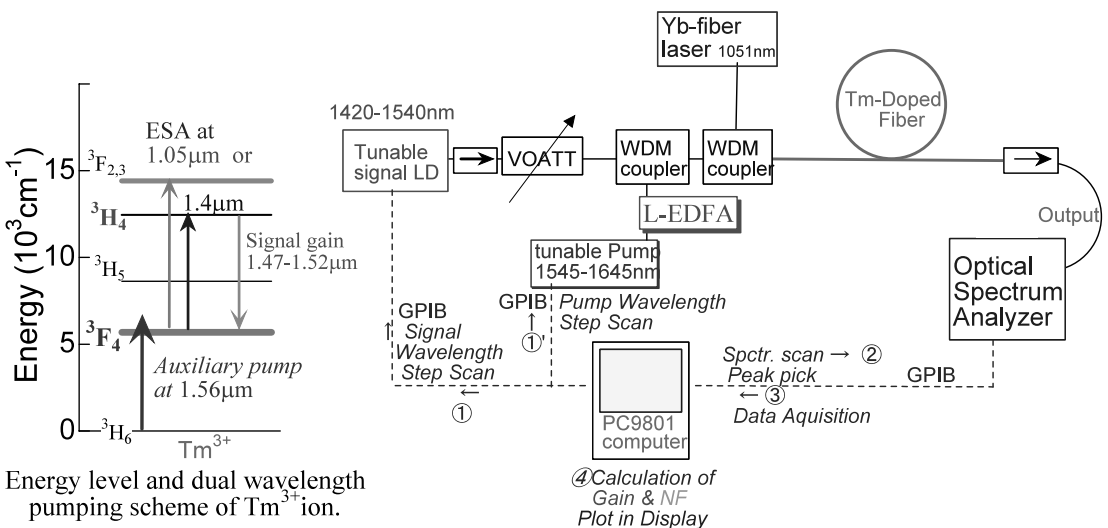
A : なるほど、どれかと共ドープしないとダメなんですね。

B : 実は終準位の占有率を下げる別の方法もある[18,22]。こちらの方が主流

なんだが、わざと始準位を直接励起せずに、1.06μmなどの波長で励起すると、終準位の³F₄からESAを起こして効率よく反転分布を形成してくれる。

A : upconversion 励起ですね。しかも波長的にNd:YAGレーザやYbファイバレーザが使えますね。でも基底状態を励起できるんですか？

B : 良い質問だ。答えはyes, ただしその励起効率は低い。一番近い³H₅準位は幅があるとはいえ、1.2μmが重心波長だからね。利得を正



Energy level and dual wavelength pumping scheme of Tm³⁺ ion.

図7 TDFの2波長励起構成と利得測定システム [24]

にするだけなら、占有率は相対的に、 $n(^3\text{H}_1) > n(^3\text{F}_1)$ の条件さえ満たしていればいいが、なるべく前者と g の絶対値も大きくしたい。そこで、2 波長励起方式が NEC から提案されている [23]。

A : 2 つもレーザを使うんですか？

B : 合波カプラを 2 種類使うことにはなる (図 7 [24]) が、主励起の $1.06 \mu\text{m}$ (または $1.4 \mu\text{m}$) の ESA 用光源に加えて、数 mW 程度の波長 $1.6 \mu\text{m}$ 弱の補助励起光を使うと、利得は格段に良くなる。しかも $^3\text{F}_4$ 準位の占有率が高くなるせいもあり、利得スペクトルが長波長シフトするんだ (図 8 [24])。

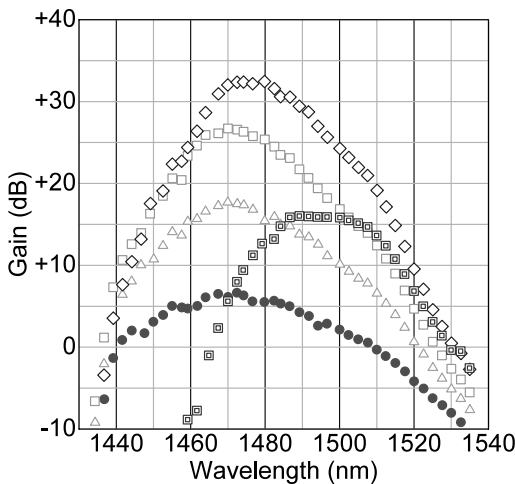


図 8 種々の 1560 nm 励起光強度に対する 2 波長励起 TDFAs の利得スペクトル: ● 0 mW , △ 10 mW , □ 20 mW , ◇ 40 mW , ■ 80 mW [24]

A : 長波長シフトすると何か良いことがあるんですか？

B : フッ化物 TDFAs の利得帯域はそれまで $1.45 \sim 1.49 \mu\text{m}$ と EDFA の帯域 ($1.52 \mu\text{m}$ ~) との間にギャップがあった。ところが、 $1.4 \mu\text{m}$ 帯の OH 倍音吸収損失に近い短波長 (S^+ バンド) よりも、 $1.50 \mu\text{m}$ 前後にまで利得シフトしたことによって、低損失側が利用でき、WDM での空白波長窓がなくなったんだ。

A : 波長資源の有効利用って奴ですね。

B : NEC は C+L バンドに 2 種類の EDFA

を、S バンドにこの利得シフト TDFAs を使い、 $273 \text{ チャンネル} \times 40 \text{ Gbit/s} = 10 \text{ Tbps}$ 伝送を世界で初めて実現した [25]。それを可能にした最新の構成アンプだったというわけだ。

A : 希土類ドープについてはだいたいわかってきました。それ以外の競合デバイスは何がありますか？

B : いくつかあるが、まず挙げるべきはラマン増幅器だろう。これは普通の光ファイバの誘導ラマン散乱を利用している [26]。例えば、Ge ドープシリカガラスの Stokes シフトは 400 cm^{-1} 程度をピークとして $300 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ に広がっていて、これは通信波長のあたりで換算すると約 100 nm のシフト、 50 nm のバンド幅になる [26]。

A : 励起光は信号光の 100 nm 短波長にするわけですね。

B : シフト波長の関係は変わってくるが、利点は、励起波長さえ変えれば、任意波長の信号光を増幅できること、複数種類の励起光を合波すれば、非常に広い増幅帯域が取れる [27] ことだ。

A : 波長が 4 f 発光バンドで制限されてしまう希土類よりずっといいじゃないですか。効率はどうなんですか？

B : それが欠点だ。例えば 30 dB の小信号利得を得るために EDFA や TDFAs の励起光パワーが 100 mW 程度のオーダーであるのに対し、W クラス、少なくとも数百 mW の光源が必要だ。

A : でも通信トラフィックがどんどん増えているから将来は使われるんでしょうね。

B : 今既に一部導入されている。もう一つのメリットは既設の伝送用ファイバに励起光を入れて、伝送路自体を分布型の増幅器にすることが出来る点だ。例えば、受信側から励起光を入れると信号強度のプロファイルは図 9 [28] のようになる。

A : 弱くなった光が終点近くで回復するんですね。受信側に近い方が励起光強度が高いか

ら、利得係数も大きい。

B：その通り。中継基地で使う EDFA のような集中型アンプの場合、送信側直後の信号光強度が強くなりすぎると、WDM では起こって欲しくない、4 波混合などの非線形効果が起こりやすい。後方励起分布型ラマン方式だと、受信側に近くなり信号光が弱くなった頃に増幅できるので、始点と終点の信号光強度の差を小さくできる。特に分散補償ファイバが伝送路の後半にあると、コアの実効断面積が小さいので、励起光密度が高くなり、より増幅利得を稼ぐことが出来る。

A：賢いですね。シリカファイバがいいんですか？

B：伝送路を利用しない集中型であれば、実はそうではなく、Stokes シフトやラマン散乱断面積が大きく増幅利得係数の大きなテルライトガラスファイバなどが性能がいいらしい [29]

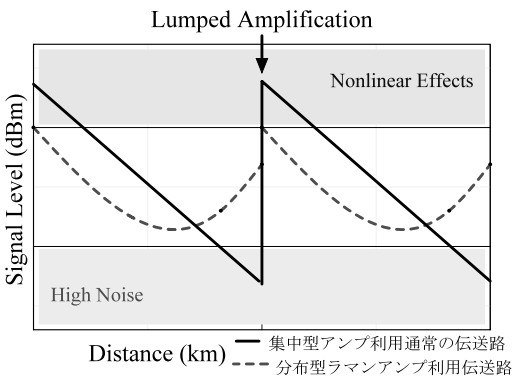


図9 分布型ラマン増幅伝送路と集中型増幅器利用伝送路における信号光強度のプロファイル [28]

A：まだまだガラス科学に課せられた課題はたくさんありそうですね。今日はありがとうございました。これ今日の土産です（といて、一升瓶を鞆から取り出して、机に置く）。

B：おお、気が利くね、日本酒は大好きなんだ。せっかくだから呑もう（と開け、コップを二つ取り出し、呑み始める）。

A：（前回持ってこいって言った [1] の忘

れてるな）

——以下は酔いながらの会話である。——

A：EDFA の開発したのは Southampton 大学のグループ [30] なんですよな。

B：そう、今日の形に近い EDF をシリカガラスで作って、Ar レーザ励起で数 dB の利得を 1.55 μm 帯で初めて観測したんだ。でも、実験室でしか使えない大型レーザでなく、LD を使って実用デバイスの形にしたのは、1989 年の日本のグループといえる [31]。

A：Er 励起用のレーザがあったんですね。

B：実は、1.49 μm 励起が非常に効率が良いことを前の年にカラーセンターレーザで実証発表していたのは、当時 Polaroid に在籍していた Snitzer 先生 [32] だけど、当時世界中にいい光源が無かった。NTT の中沢先生（現東北大）は、当時日本の電気メーカがラマン増幅器用に開発していたのを聞きつけ、その協力で、理想的な LD 光源を入手するという幸運にも恵まれていたんだ [33]。

A：そのメーカはラマン増幅器の方を狙っていたんですね？ SiO₂ ガラスのラマン散乱の Stokes シフトが、Er³⁺ イオンの ⁴I_{13/2} 準位の Stark 分裂と不均一広がりによる蛍光の Stokes シフトと同程度だったんですね。なんて偶然だろう。

B：ラマンと希土類と歴史的にどちらが古いかはまた話が別だ。Snitzer がバリウムクラウンガラスにおいて、希土類である Nd³⁺ のレーザ発振を実現したのは 1961 年だよ [34]。

A：Maiman によるルビーレーザ発明が 1960 年ですから翌年ですね。しかも初のガラスレーザだ。

B：Snitzer は 64 年にはガラスの特徴を活かしてファイバ化することにより励起効率を上げ、ファイバレーザ [35] を実現した。

A：そんな昔に光ファイバ用の励起光源はあったんですか？

B：あるわけない、当時はフラッシュランプの周りに Nd ファイバを巻き付けて、側面から

励起していたんだ。70年には、それで波長1.06 μm の $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ -LD の光増幅 [37] を行っている。

A : LD 光の光増幅だったら、まさにファイバアンプそのものですね。確か Bell 研の林巖雄博士たちが初めて LD の室温連続発信に成功したのが、1970年。

B : Er-Yb 共ドープガラスで 1.54 μm レーザ発振 [36] をも実現したのが 65年。

A : EDFA の 20 年以上前に Er レーザガラスはあったんですね。早すぎるというか、87年に EDF で光増幅をするまでに長いブランクがあったなんて。

B : 理由は、今の光通信システムを構成する要素デバイスがまだ無かったために、研究者の関心が薄く、そのポテンシャルが認識されていなかったからだと考えられる。

A : 光ファイバの最低損失波長が 1.55 μm だとわかったのも 80 年代になってからですね。

B : 80 年代中盤に長距離光通信システムの実用化が本格化してきたために、中継増幅器として、光→電気→光の変換を必要としない光増幅器開発の要請が高まってきて、誘導放出により光を直接光で増幅する、希土類ドープファイバはまさに理想的な増幅媒体であることが再認識されたということができよう。

文献

- [1] 田部勢津久, 「ニューガラス」20 [1], (2005) 54.
(本稿はこの続編である)
- [2] G. H. Dieke, H. M. Crosswhite, *Appl. Opt.* 2, (1963) 675.
- [3] 例えば, 霜田光一, 「レーザー物理入門」(岩波, 1983) p. 89.
- [4] Y. Kubota, T. Teshima, N. Nishimura, S. Kanto, S. Sakaguchi, Z. Meng, Y. Nakata, T. Okada, *IEEE Photon. Tech. Lett.* 15(4), 525.
- [5] A. Mori, Y. Ohishi, M. Yamada, H. Ono, Y. Nishida, K. Oikawa, S. Sudo, *OFC'97* (Dallas, 1997) PD 1.
- [6] S. Tanabe, E. Snitzer, J. S. Wang, 第 38 回 ガラス
- フォニクス材料討論会 (長岡, 1997) A-10, p. 18.
- [7] X. Feng, S. Tanabe, T. Hanada, *J. Am. Ceram. Soc.* 84 [1] (2001), 165.
- [8] N. Sugimoto, Y. Kuroiwa, K. Ochiai, Y. Fukasawa, S. Ito, S. Tanabe, T. Hanada, *OAA 2000* (Quebec, 2000) PD-3.
- [9] S. Tanabe, N. Sugimoto, S. Ito, T. Hanada, *J. Luminesc.* 87-89 (2000) 670.
- [10] 杉本直樹, 「オプトロニクス」2002 [10], 130.
- [11] M. Yamada, M. Shimizu, Y. Ohishi, J. Temmyo, T. Kanamori, S. Sudo, *IEEE Photon. Tech. Lett.* 5 [9], (1993) 1011.
- [12] Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Kitagawa, S. Takahashi, E. Snitzer, G. H. Sigel, *Opt. Lett.* 16 (1991) 1747.
- [13] S. Tanabe, T. Hanada, M. Watanabe, T. Hayashi and N. Soga, *J. Am. Ceram. Soc.* 78 [11], (1995) 2917.
- [14] S. Tanabe, C. R. *Chimie (Comptes Rendus de L'Academie des Science)* 5, (2002) 815.
- [15] Y. Miyajima, T. Komukai, *Electron. Lett.* 26 (1990) 194.
- [16] 例えば, 大石泰丈, 「応用物理」68 [1], (1999) 48.
- [17] T. Sakamoto, M. Shimizu, M. Yamada, T. Kanamori, Y. Ohishi, Y. Terunuma, S. Sudo, *IEEE Photon. Tech. Lett.* 8 [3] (1996) 349.
- [18] T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa, Y. Miyajima, *IEEE J. Quant. Electron.* 31 [11] (1995) 1880.
- [19] T. Sakamoto, M. Shimizu, T. Kanamori, Y. Terunuma, Y. Ohishi, M. Yamada, S. Sudo, *IEEE Photon. Tech. Lett.* 7 [9] (1995) 983.
- [20] S. Tanabe, "Rare-Earth-Doped Materials and Devices V", (eds. S. Jiang, SPIE vol. 4282, 2001) p. 85.
- [21] S. Tanabe, T. Tamaoka, T. Hanada, Y. Kondo, N. Sugimoto, S. Ito, *OAA 2001* (Stresa, 2001) OWB 4.
- [22] S. Tanabe, X. Feng, T. Hanada, *Opt. Lett.* 25 [11] (2000) 817.
- [23] T. Kasamatsu, Y. Yano, H. Sekita, *OAA'99* (Nara, 1999) PDP 1.
- [24] S. Tanabe, T. Tamaoka, *OFC 2002*, (Anaheim, 2002) ThZ 4, p. 572.
- [25] K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasawara, T. Ono, *OFC 2001*, (Anaheim, 2001) PD 24.
- [26] R. H. Stolen, E. P. Ippen, *Appl. Phys. Lett.* 22, (1973) 276.
- [27] Y. Emori, Y. Akasaka, S. Namiki, *Electron. Lett.* 34, [22], (1998) 2145.
- [28] S. Namiki, Y. Emori, *Opt. & Photon. News* (2002) 52.
- [29] A. Mori, H. Masuda, M. Shimizu, *Tech. Dig. ECOC'02*, (2002) S 3. 1.
- [30] R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole, D. N. Payne,

- Electron. Lett.* 23 [3] (1987) 1026.
- [31] M. Nakazawa, Y. Kimura, K. Suzuki, *Appl. Phys. Lett.* 54, (1989) 295.
- [32] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminel, B. C. MaCollum, *Tech. Digest Optical Fiber Communication 1988 (OFC'88)*, (Anaheim, 1988), PD 2.
- [33] 中沢正隆, "この人に聞く"「オプトロニクス」 227, (2000) 103.
- [34] E. Snitzer, "Optical Maser Action of Nd^{3+} in a Barium Crown Glass," *Phys. Rev. Lett.* 7, 444 (1961)
- [35] C. J. Koester, E. Snitzer, "Amplification in a Fiber Laser," *Appl. Opt.*, 3, (1964) 1182.
- [36] E. Snitzer, R. Woodcock, " Yb^{3+} - Er^{3+} Glass Laser," *Appl. Phys. Lett.* 5, (1965) 45.
- [37] B. Ross, E. Snitzer, "Optical Amplification of 1.06 μm $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ Injection-Laser Emission," *IEEE J. Quant. Electron.* QE-6, (1970) 361.