

高出力光増幅用 Er, Yb 共添加ファイバの開発

Development of Er, Yb Co-Doped Fiber for High Power Optical Amplifier

相 曾 景 一* 田 代 至 男*2 鈴 木 恒 夫*3 八 木 健*
Keiichi Aiso Yoshio Tashiro Tsuneo Suzuki Takeshi Yagi

概 要 近年の波長分割多重 (WDM) 伝送システムにおける大容量化の進行に伴い、エルビウム (Er) 添加光ファイバ増幅器 (EDFA) に対してより高い光出力が求められている。出力レベルの増大により EDFA 内でも 4 光波混合 (FWM) や相互位相変調 (XPM) 等の非線形効果による光信号の波形歪 (ひず) みが増大化してきている。これまで Er 添加光ファイバ (EDF) におけるファイバパラメータは増幅効率の向上の観点から最適化が行われてきたが、増幅効率重視の設計では逆に非線形性は高くなってしまふ。このことが EDF における低非線形化を困難にしていた。今回、Er, Yb (イットリビウム) 共添加ファイバ (EYDF) を開発し、増幅効率を低下させることなく低非線形化の実現に成功した。これを 1480 nm レーザダイオード (LD) で励起することにより、低非線形性と高出力特性とを両立させた Er, Yb 共添加光ファイバ増幅器 (EYDFA) を実現した。

1. はじめに

インターネット等による通信需要の急激な拡大に対応するため、光ファイバ伝送路における伝送容量拡大の検討が活発に行われている。それに伴い WDM 伝送システムにおける大容量化 (チャンネル数の増大、伝送帯域の拡大) が進行している。WDM 伝送路での大容量化のためには、光ファイバアンプの高出力化、広帯域化の実現が不可欠であり、光ファイバアンプがますます重要なキーデバイスとして着目されている。

WDM 伝送システムにおけるチャンネル数の増加はトータルの入力信号パワーの増大をもたらし、その結果、1550 nm 帯の WDM 信号を一括増幅する EDFA に対して、より高い出力が求められるようになってきている。

EDFA の高出力化は EDF の高効率化と励起 LD の高出力化と共に進行してきた。当社では高励起条件下で良好な変換効率を実現できるよう EDF におけるファイバパラメータの最適化を行っており、励起光から信号光への量子変換効率は 90% 以上と非常に高い変換効率を達成している¹⁾。励起 LD に関しては 1480 nm LD 自体での高出力化²⁾にくわえて、LD の波長多重合成と偏波合成技術を駆使して励起光の高出力化を図ってきた³⁾。これらの技術により、1.5 W の信号光出力を有する EDFA を実現している⁴⁾。

また 1480 nm LD 以外にもいくつかの高出力励起光源が提案されている。例えば 1480 nm CRR (Cascaded Raman Resonator) を励起光源として用いた EDFA が報告されている⁵⁾。

EDF の励起波長としては上記の 1480 nm のほかに 980 nm が一般的に使用されている。しかし 980 nm 励起では励起光から信号光へのパワー変換効率が 1480 nm 帯に比べて低く、更に吸収スペクトルの幅が狭いため波長多重合成が困難であり、EDF の高出力化という観点からは不利である。

励起光源の選択肢を拡 (ひろ) げるため、Er とともに Yb (Ytterbium) を共添加した EYDF も検討されている。EYDF は Yb の励起準位からのエネルギー伝達現象を利用して Er の準位間で反転分布を形成させ、そこからの誘導放出により信号光を増幅するものである。Yb は 800-1100 nm に広い吸収帯を有しており、波長 1064 nm の Nd:YAG レーザや、最近では Nd ドープダブルクラッドレーザを励起光源とした報告がなされている^{6),7)}。

以上のように EDFA の出力は励起光源の出力に依 (よ) るところが大きい。しかし通常の EDF のコア径は数 μm から大きくても 10 μm 程度であるため、この微小な断面に結合可能な励起光強度には自 (おの) ずと限界が存在する。この制限を緩和するため、信号光はコア部をシングルモード伝搬し、励起光はコア部を取り囲む第一クラッド部をマルチモード伝搬するダブルクラッドアンプが検討されている^{8),9)}。ダブルクラッドアンプはサイドポンピング配置となり、励起光を直接コア部に結合させる場合より、効率は低下するものの、ワットクラス出力のマルチモード LD を励起光源に利用できるため結果的にワットクラスのアンプ出力を比較的容易に実現できる技術として期待されている。

しかし、このようなワットクラス出力の光アンプの実現は、従来では無視できるレベルであった光増幅用光ファイバ中での非線形現象の顕在化という新たな問題を引き起こすに至っている。効率改善を主眼において設計された光増幅用光ファイバで

* ファイナルフォトニクス研究所 研究部光ファイバ Gr.

*2 ファイナルフォトニクス研究所 WP チーム光伝送 Gr.

*3 光ファイバ事業部 千葉ファイバ製造部 TF チーム

は、ワットクラスの出力を得ようとした場合、もはやこの非線形現象による信号光の伝送品質劣化を無視できない状況となっている。そこで我々は高出力光アンプに用いる増幅用光ファイバにおける非線形性を増幅効率の劣化なく低減する検討を行ってきた。本報告では高出力光アンプ用EDFにおける低非線形化技術を中心に報告する。

2. EDFにおける低非線形化

WDM伝送路におけるチャンネル数の増加、そして1チャンネルあたりの出力光強度の増大に伴い、EDFA内での4光波混合(FWM)¹⁰⁾、相互位相変調(XPM)¹¹⁾等の非線形光学効果の発現が顕在化してきた。また伝送帯域拡大のため、従来のC-BAND帯に比べてL-BAND帯も実用化されているが、利得係数が小さいL-BAND帯ではより長尺のEDFが必要となる。そのためL-BAND用EDFAはC-BAND用に比べ、非線形効果が発現しやすい^{12), 13)}。EDF内での非線形現象による波形歪みの量は式1によって見積もることができる¹⁴⁾。

$$\kappa P_0 L_{\text{eff}} = \frac{\kappa P_0}{g} [\exp(gL) - 1] = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \frac{P_0}{g} [\exp(gL) - 1] \quad (1)$$

ただし $\kappa (=2\pi n_2/A_{\text{eff}})$:非線形定数, L_{eff} :有効相互作用長, n_2 :非線形屈折率, A_{eff} :有効コア断面積, P_0 :1チャンネルあたりの平均入力光強度, g :平均利得係数, L :EDF長である。上式から明らかかなようにEDFにおける非線形現象の発現を抑制するためには、有効コア断面積 A_{eff} 、利得係数 g を増大させる必要がある。ここで上式における入力光強度 P_0 、及び利得 $G = \exp(gL)$ はEDFAの用途に応じて適宜設定される。

EDFにおける有効コア断面積 A_{eff} は一般的に通常のシングルモードファイバ(SMF)に比べ、一桁(けた)小さい値である。これはEDFにおける利得特性を高効率化するためである。比屈折率差 Δ を上げること、言い換えれば有効コア断面積を小さくすることで励起光密度を高めてコア全体にわたって良好な反転分布を形成させている。逆に言えばEDFにおける有効コア断面積を大きくすることは励起光から信号光へのパワー変換効率(PCE)の低下を引き起こすことになる。そのため有効コア断面積の設定はEDFに入射する励起光強度に応じ、変換効率の低下のないように最適設計されなければならない。

EDFにおける利得係数 g を増大させるためには、Erイオンの添加量を増加させる必要がある。しかしエルビウム濃度を高めていくと、濃度消光(concentration quenching)による増幅効率低下を引き起こす。この現象はEr密度が増加することでErイオン間距離が短くなり、イオン間の相互作用が起こることに起因する。一般的に濃度消光が起こる限界のEr濃度としては純SiO₂ホストの場合、数百wtppm、濃度消光の抑制効果のあるAlを共添加したAl₂O₃-SiO₂ホストの場合でも1000wtppm程度と言われており¹⁵⁾、そのためErの高濃度化による利得係数 g の向上には限界がある。

このように従来設計のEDFを高出力アンプに適用しようとした場合、低非線形性と高変換効率の両立は非常に困難な状況である。したがって、この問題を解決するためには従来とは異なる新たな設計手法が必要である。

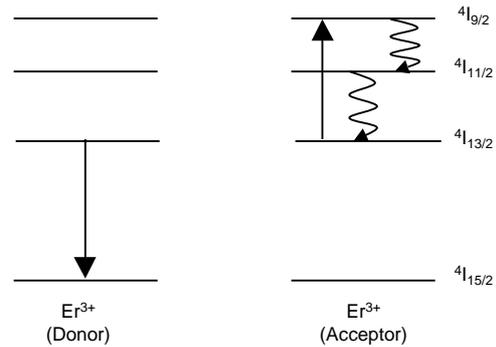


図1 Cooperative Upconversion Processの概念図
Schematic diagram of cooperative upconversion process

3. EDFにおける濃度消光抑制

EDFにおけるEr添加濃度を増加させていくと、濃度消光によりEDFAの励起効率が減少していく。イオン間隔が減少していくと図1のように $4I_{13/2}$ 準位に励起された2つの近接するErイオンが相互作用し、片方のイオンはもう片方のイオンにエネルギーを伝達して $4I_{15/2}$ 準位に遷移し、エネルギーを伝達されたイオンは $4I_{9/2}$ 準位に励起される(Cooperative Upconversion)。

この $4I_{9/2}$ 準位に励起されたイオンは非放射遷移(多重フォノン放出)によって再び $4I_{13/2}$ 準位に緩和し、結果として量子変換効率の低下を引き起こす¹⁶⁾。

Cooperative Upconversion現象はSiO₂ホストガラスへのErイオンの配位の仕方に関する。ErイオンのSiO₂ガラスへの溶解度は低い。そのため純シリカコアにErイオンを添加した場合、Erイオン同士がクラスタリングを形成することで、チャージバランスを保ち、シリカネットワークの中に溶解する¹⁷⁾。このクラスタリング形成によってイオン間距離が減少し、Cooperative Upconversionを引き起こすことになる。

クラスタリングの形成に起因する濃度消光はPair induced quenching (PIQ)と呼ばれている¹⁸⁾。このPIQを抑制する試みがコアの組成や製法を変えて行われている。最も一般的な方法として知られているのはAl₂O₃を共添加することである。AlイオンがErイオンの周りに配位して、Solvent Shellを形成することでチャージバランスがとれ、Erイオンのシリカホストへの溶解度が向上する。これによりErイオンのクラスタリングが抑制される。純SiO₂ホストの場合、Er濃度が数百wtppm程度で濃度消光が発生するが、Alを共添加することで1000wtppm程度のEr濃度まで濃度消光が抑制されることが知られている¹⁵⁾。また最近ではコアガラスを変えることでErの溶解度を向上させ、濃度消光を抑制した例が報告されている¹⁹⁾。

4. Yb共添加によるPIQの抑制

ErとともにYbを共添加したEYDFは1064 nm Nd:YAGレーザー等の高出力レーザーを励起光源として使用できることから、高出力光増幅用ファイバとして検討が行われてきた⁶⁾。高出力な1480 nm, 980 nm LDの実用化によって、現在の通信用光アンプにおいてはほとんどEDFが使用されているが、近年、ダブルクラッドアンプ用ファイバとしてEYDFが再び注目され

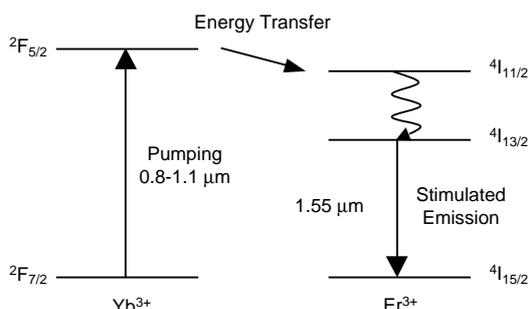


図2 Er/Yb系におけるエネルギー準位モデル
Erbium-Ytterbium energy level diagram

ている⁸⁾。

図2にEr/Yb系のエネルギー準位モデルを示す。EYDFではYbイオンが800 ~ 1100 nm帯の励起光により $2F_{5/2}$ 準位へ励起された後、Erイオンとイオン間相互作用することでErイオンを $4I_{11/2}$ 準位に励起し (Energy Transfer), Ybイオンは基底準位 $2F_{7/2}$ に遷移する。

$4I_{11/2}$ 準位に励起されたErイオンは $4I_{13/2}$ に非放射過程で緩和し、 $4I_{13/2}$ - $4I_{15/2}$ 準位間において反転分布を形成し、誘導放出により光信号を増幅する。

YbイオンもErイオンと同様にシリカホストへの溶解度が低い。また同程度のイオン半径を持つため、ErイオンとYbイオンとが一緒にクラスタリングすることになる。これによりYbイオンとErイオンのイオン間距離が短くなることで、効率の良いエネルギー転送が行われる²⁰⁾。

このことはつまりErイオンの周りにYbイオンが複数個配位してクラスターを形成することで、Erイオン同士のイオン間距離が広がることを意味する。したがってErイオン間で起こるPIQは減少するはずである。我々はこの点に着目してYbを共添加した場合のPIQの抑制効果について検証を行った。

今回、評価したEYDFはEr濃度を2000 wtppmまで高めたものを使用した。濃度消光が起こっているかどうかを判断するため、このEYDFと通常のEDF (Er濃度650 wtppm, 1000 wtppmの2種類) において $4I_{13/2}$ 準位の蛍光寿命の測定を行った。濃度消光が起こっている場合、この蛍光寿命が短くなる現象が観測される。測定結果を図3に示す。Er濃度が1000 wtppmのEDFにおいて、励起光強度が高くなっていくと蛍光寿命が短くなっていく現象が観測されている。これは励起光強度が強くなるにつれて、励起準位に存在するErイオンの数が増え、Cooperative Upconversionが発生していったためだと考えられる。したがってEr濃度が1000 wtppmのEDFでは既に濃度消光が発生していると判断できる。これに対し、EYDFではEr濃度が2000 wtppmと高濃度ではあるが、蛍光寿命の励起光強度依存性はなく、顕著なCooperative Upconversion現象は発生していないと考えられる。この結果からYbを共添加することで、EDFにおける濃度消光に起因するEr添加濃度限界 (~ 1000 wtppm) を向上させることが可能であることが明らかになった。

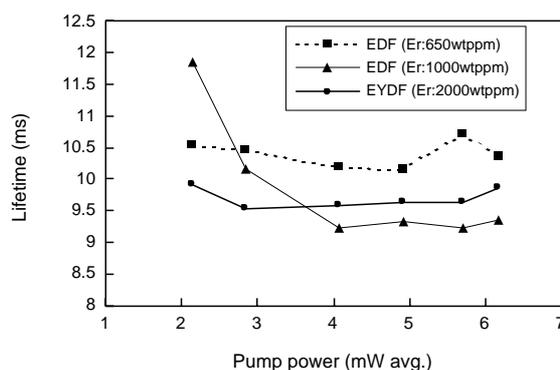


図3 蛍光寿命の励起光パワー依存性
Pump power dependence of fluorescence lifetime

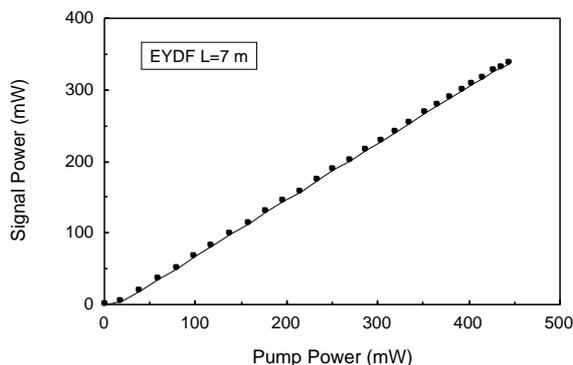


図4 1480 nm励起EYDFにおける出力信号光強度の励起光パワー依存性
Pump power dependence of output signal power for 1480 nm pumped EYDF

5. 1480 nm 励起 EYDF

これまで述べてきたようにEYDFはYbの広い吸収帯を利用できるため、励起光源の選択の幅が広がる利点があった。これまでに報告されているEr, Yb共添加光アンプ (EYDFA) においては、当然のことながらYbの吸収帯と一致する波長の励起光源を用いて励起を行っている。この場合、Ybイオンの $2F_{5/2}$ 準位からErイオンの $4I_{11/2}$ 準位へのエネルギー伝達の効率はEr, Ybイオンの配合比やコア材料に大きく依存しており、励起光から信号光への変換効率を向上させるためには、コア組成の最適化が不可欠である²¹⁾。更にEYDFを980 nmで励起した場合、EYDFは $4I_{11/2}$ 準位から $2F_{5/2}$ 準位への逆遷移やYb準位間での emission 等、複雑なエネルギー遷移過程を経るため、EDFに比べ変換効率の値は本質的に低い値となる。

そこで筆者らはYbの吸収の影響がない1480 nm帯LDを用いてEYDFを励起することを試みた²²⁾。1480 nm励起の場合、Ybイオンは光学的にはほとんど不活性であると考えられ、Erイオンのスペーサーとしての役割、つまりPIQ抑制剤としての効果が期待できる。

実際にEYDFを1480 nm励起光で励起した場合における出力信号光強度の励起光強度依存性の測定結果を図4に示す。濃度消光の発生は励起光から信号光へのパワー変換効率 (PCE) の低下をもたらす。そのためPCEの値を測定することは濃度消

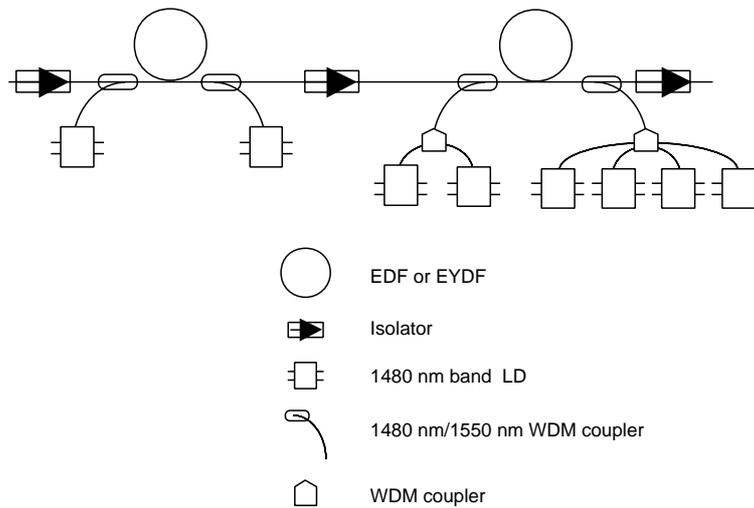


図5 WDM アンプ構成図
Schematic of WDM amplifier

表1 EYDF, EDF ファイバパラメータ
Characteristics of EYDF and EDF

Type	EYDF	EDF
Core composition	Er ₂ O ₃ -Yb ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -GeO ₂ -SiO ₂	Er ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -GeO ₂ -SiO ₂
Er concentration (wt%)	0.2	0.065
Peak Absorption (dB/m) @1530 nm	22.7	2.4
MFD (μm) @1550nm	7.0	5.8
Chromatic Dispersion (ps/nm/km) @1550 nm	-5	-25

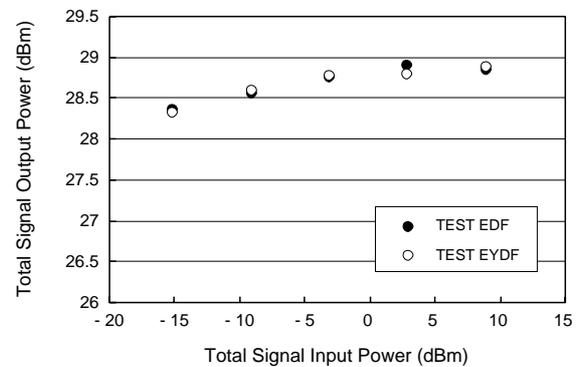


図6 出力光強度の入力信号光強度依存性
Signal input power dependence of signal output power

光が起こっているか否かのひとつの指標となりうる。

測定は1480 nm 双方向励起の1段アンプ構成とし、信号光波長1560 nm、信号光強度0 dBmの条件で行った。EYDFの最適長は7 mであった。この結果からEYDFにおけるPCEを求めると76%となる。量子変換効率(QCE)に換算すると80%となり、通常のEDFと比べても遜色(そんしょく)のない値を達成している。この結果からもこのEYDFにおいて顕著な濃度消光は起こっていないことが明らかになった。

6. WDM 信号増幅特性

図5にWDM信号増幅特性の評価に用いたアンプの構成図を示す。今回評価したEYDFとEDFにおけるファイバパラメータを表1に示す。アンプ構成は波長多重1480 nm励起LDを用いた2段構成のアンプとした。8個の高出力1480 nm LDを用いてトータル1.56 Wの励起光をEDF/EYDFに入射させた。EDF, EYDFのファイバ長はそれぞれ30 m(1段目) + 51 m(2段目), 4.5 m(1段目) + 7 m(2段目)とした。

上記の配置で2 nm間隔の8チャンネルWDM信号を入力させ、高出力動作条件下でのアンプ特性を評価した。図6にトータル入力光強度に対するトータルの出力光強度をプロットしたグラフを示す。最大のトータル出力光強度は28.8 dBm(760 mW)、1チャンネルあたりほぼ20 dBm/chの出力を達成して

いる。この高出力特性をわずか8個の励起LDで実現している。これは高効率EDF, 高出力LD, そして効率の良い波長合成技術を駆使することで可能となった。

このEDFA, EYDFAにおけるアウトプットスペクトルをそれぞれ図7, 図8に示す。両者のスペクトルを比較すると非線形現象発現の度合いに明らかな違いがあることがわかる。EDFにおいては顕著なFWM光が観測されているのに対して、EYDFではFWM光はほとんど発現していない。アンプに使用したEDFのファイバ長はトータルで81 m, EYDFは11.5 mである。このファイバ長の違いがFWM光の発現に大きな影響を与えている。つまりYbを共添加して従来のErの濃度添加限界を向上させることによって、有効相互作用長 L_{eff} を短く、言い換えれば利得係数 g を大きくできたことで、従来のEDFより非線形性を抑制することが可能となった。

以上の結果からEYDFは低非線形性を兼ね備えた高出力アンプ用ファイバとして大きな可能性を有していることが明らかになった。

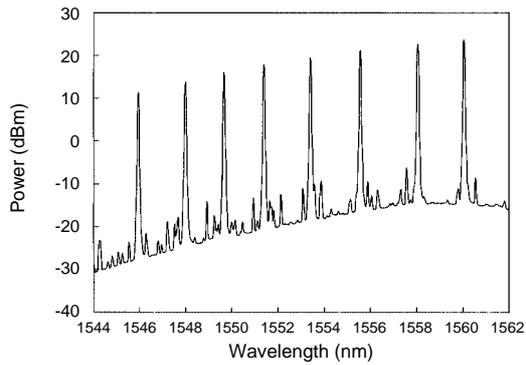


図7 EDFにおける Output Spectrum
Output spectrum of EDF

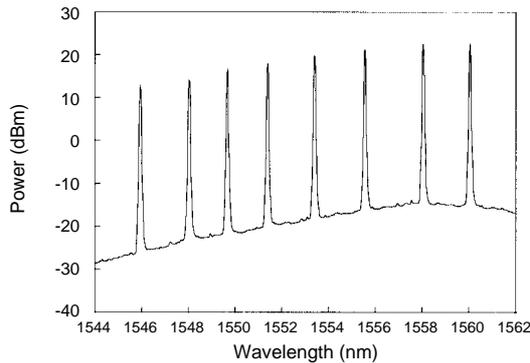


図8 EYDFにおける Output Spectrum
Output spectrum of EYDF

7. おわりに

EDFにYbを共添加させることで、濃度消光に起因する変換効率の低下を抑制しつつ、従来のEDFにおけるEr添加濃度限界を向上させることに成功した。今回開発したEYDFを1480 nm LDで励起することにより、これまでではトレードオフの関係であった低非線形特性と高変換効率特性とを両立した高出力アンプを実現した。

今後はL-BAND領域における適用の可能性の検討、更なるEr高添加をめざしたコア組成の最適化、アンプ用ファイバの構造パラメータを含めた更なる低非線形化の検討を行っていく。

参考文献

- 1) 田代至男, 小柳諭, 相曾景一, 田中完二, 並木周, 古河電工時報 第104号 平成11年7月 p.59.
- 2) T. Kimura, N. Tsukiji, A. Iketani, N. Kimura, H. Murata, Y. Ikegami, Optical Amplifiers and their Applications, (1999), ThD12.
- 3) K. Tanaka, K. Iwashita, Y. Tashiro, S. Namiki, and S. Ozawa, Optical Fiber Communication Conference, (1999), TuH5.
- 4) Y. Tashiro, S. Koyanagi, K. Aiso and S. Namiki, Optical Amplifiers and their Applications, (1998), WC-2.
- 5) G.R.Jacobovitz-Veselka, R. P. Espindola, C. Headley, A.J. Stentz, S. Kosinski, D. Inniss, D. Tipton, D. J. DiGiovanni, M. Andrejco, J. DeMarco, C. Soccolich, S. Cabot, N. Conti, J. J. Veselka, L. Gruner-Nielsen, T. Strasser, R. Pedrazzani, A. Hale, K. S. Kranz, R. G. Huff, G. Nykolak and P. Hansen, Optical Amplifiers and their Applications, (1997), PD-3.

- 6) S. G. Grubb, W. F. Humer, R. S. Cannon, T. H. Windhorn, S. W. Vendetta, K. L. Sweeney, P. A. Leilabady, W. L. Barnes, K. P. Jedrzejewski, and J. E. townsent, IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 4, (1992), p. 553.
- 7) S. Grubb, D. J. DiGiovanni, J. R. Simpson, W. Y. Cheung, S. Sanders, D. F. Welch, B. Rockney, Optical Fiber Communication Conference, (1996), TuG4.
- 8) F. Di Pasquale, G. Grasso, F. Meli, G. Sacchi, S. Turolla, Optical Fiber Communication Conference, (1999), WA2.
- 9) J. M. Sousa, J. Nilsson, C. C. Renaud, J. A. Alvarez-Chavez, A. B. Grudinin, and J. D. Minelly, IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 11, (1999), p.39.
- 10) Y. Jaouen, J.-P. Bouzinac, J.-M. P. Delavaux, C. Chabran and M. Le Flohic, Electron. Lett., vol. 36, no. 3, (2000), p.233.
- 11) M. Shtaif, M. Eiselt, R. W. Tkach, R. H. Stolen and A. H. Gnauck, Optical Amplifiers and their Applications, (1999), PD4.
- 12) S. Radic, G. Pendock, A. Srivastava, P. Wysocki and A. Chraplyvy, European Conference on Optical Communication, (1999), PD1-11.
- 13) M. Eiselt, M. Shtaif and R. W. Tkach, Optical Fiber Communication Conference, (1999), ThC1.
- 14) G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics 2nd edition, 1995 Academic Press Inc.
- 15) R. I. Laming, D. N. Payne, F. Meli, G. Grasso, E. J. Tarbox, Optical Amplifiers and their Applications, (1990), MB3.
- 16) S. Sudo, Editor, Optical fiber Amplifiers: Materials, Devices, and Applications, Artech House, Inc., Boston, (1997), p. 174.
- 17) K. Arai, H. Namikawa, K. Kumata and T. Honda, J. Appl. Phys., vol. 59, (1986), p. 3430.
- 18) P. Myslinski, D. Nguyen and J. Chrostowski, J. of Lightwave Tech., vol. 15, no. 1, (1997), p. 112.
- 19) N. Sugimoto, Y. Kuroiwa, K. Ochiai, S. Ohara, Y. Fukasawa, S. Ito, Optical Amplifiers and their Applications, (2000), PD-3.
- 20) M. Federighi, and F. Di Pasquale, IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 7, (1995), p. 303.
- 21) W. L. Barnes, S. B. Poole, J. E. Townsend, L. Reekie, D. J. Taylor, and D. N. Payne, J. of Lightwave Tech., vol. 7, no. 10, (1989), p. 1461.
- 22) Y. Tashiro, K. Mori, T. Izumikawa, H. Nimura, K. Aiso, T. Yagi, S. Namiki, Proc. Optical Amplifiers and their Applications, (2000), OtuA3.