

大容量波長分割多重伝送における広帯域光増幅技術

石川悦子

Broaden Optical Amplification Technology for High Capacity WDM Transmission

Etsuko ISHIKAWA

This paper reports the searches of the bandwidth expansion of the erbium doped fiber amplifier (EDFA) and the ultra wide bandwidth Raman amplifier as the amplification technologies for a high capacity WDM transmission. First, it looks back at the fundamental principle of EDFA through development stories of C band EDFA and L band EDFA. Then, a new approach using EDF to the S band optical amplifier is shown as a search for the possibility of EDF. Next, using a broadband distributed Raman amplifier with pump-and-signal wavelength-interleaving allocation is introduced as the different approach from a rear earth doped fiber amplifier. Finally, I try to discuss the candidate of next generation amplifiers.

Key words: Er doped fiber amplifier, Raman amplifier, S band, wavelength division multiplexing (WDM)

1987年に登場したエルビウムドープファイバー増幅器(EDFA: erbium doped fiber amplifier)は、波長分割多重(WDM: wavelength division multiplexing)伝送技術による伝送容量の増大に大きく貢献した。1995年ごろに、1550~1560 nmを増幅帯域とするEDFAを用いた2.5 Gbit/sを四波多重した10 Gbit/sの光通信が実現すると大容量化のための技術開発が加速され¹⁾、その後EDFAは増幅帯域を1530~1565 nmに拡大したCバンドEDFAが開発され、つづいて1570~1610 nmを増幅するLバンドEDFAが開発された。これらの光増幅器は、CバンドとLバンドのデュアルバンド構成による大容量化を可能とし、1.8 Tbit/s伝送装置の商用化を成功させた²⁾。一方、大容量化の研究開発では、Cバンド・Lバンドに次ぐ第3のバンドであるSバンドの1480~1510 nmを増幅する利得シフトトリウムドープファイバー増幅器が開発され、3種類の光増幅器を組み合わせた10.9 Tbit/sの伝送実験が話題を呼んだ³⁾。また、光増幅帯域を任意に設計できるラマン増幅器を用いて、SバンドからUバンドの1450~1661 nmの432波を伝送することに成功し、1000波多重の可能性が

示されている⁴⁾。このように2002年までは大容量伝送の報告が相次いだが、それ以降は、2000年3月に始まったITバブルの崩壊による研究開発のスピードの鈍化がみえはじめる。しかし、大容量伝送に向けた研究開発は地道に進められ、光ファイバー1芯あたりの伝送容量を上げるための①新規伝送帯域の開拓、②波長多重の高密度化、③波長あたりのビットレートの向上、などへの取り組みがなされている。

本稿では、新規伝送帯域の開拓のための光増幅器の帯域拡大技術に着目し、EDFAの増幅帯域拡大の追求と、SバンドからUバンドまでを増幅する超広帯域ラマン増幅器について概説する。

1. EDFAの増幅帯域拡大の追求

1.1 EDFの基本特性

希土類3価イオンの4f-4f電子遷移の誘導放出現象は、増幅媒体の形状を光ファイバーとすることで、高効率な光増幅器を可能とした。希土類3価イオンの種類によって増幅帯域はほとんど決定されるが、Er³⁺の誘導放出現象と光

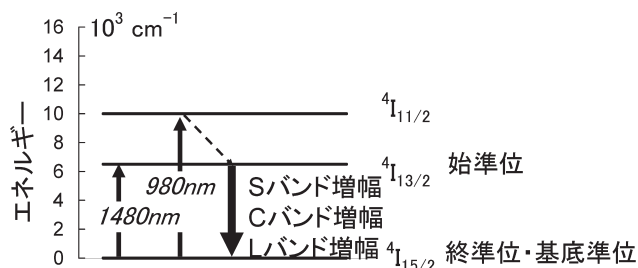


図1 Er³⁺ のエネルギー準位。

ファイバーの最低損失波長が 1550 nm 帯で一致し、この偶然の一致が光通信分野の発展に貢献したことはいうまでもない。

Er³⁺ は図 1 に示すように終準位と基底準位を同じとする三準位系であり、ほとんどの Er³⁺ イオンが誘導放出に寄与できることから、高出力な光増幅器を構成しやすく、高出力化が必要な波長多重増幅器に適したイオン種でもある。励起光源には、高出力特性が得られる 1480 nm 帯 LD、低雑音特性が得られる 980 nm 帯 LD が用いられている。増幅帯域は、すでに商用化された C バンドと L バンドに加え、1490～1520 nm の S バンド領域についても検討されている。

EDF の利得係数の波長特性は、図 2 に示すように、全イオン密度 n_t と始準位イオン密度 n_2 の比の反転分布率 n_2/n_t をパラメーターに用いて表すことができる。EDF 長の設計や励起光の制御、EDFA 構成によって n_2/n_t を変化させ、C バンドと L バンド、そして S バンドの増幅を実現している。

1.2 C バンド EDFA と L バンド EDFA

C バンドでは n_2/n_t を 70% 付近になるように制御し、利得等化器と組み合わせることで、平坦な波長特性をもつ波長多重増幅器を実用化した。また、Er³⁺ の三準位系の特徴を利用して EDF を長尺にすることで、L バンドの利得が得られることが知られている。このとき、EDF の長手方向の平均 n_2/n_t を 40% 程度にすることで、この波長領域で波長特性が比較的平坦となり、20～25 dB の利得を得ることができる⁵⁾。しかしながら、図 2 に示すように、 n_2/n_t が 40% のときの相対利得係数は 0.05 dB/m 以下と小さく、C バンドに比べ約 5～10 倍の長尺 EDF と高出力の励起光源が必要となる。1997 年以降の設備投資ブームの追風、C バンド EDFA を実用化するための要素技術の蓄積、励起 LD の高出力化などがあって、1997 年の L バンド EDFA の発表以降⁵⁾、急速に研究開発が進み、1998 年の L バンド伝送実験の報告⁶⁾、2001 年には商用システムに搭載された²⁾。

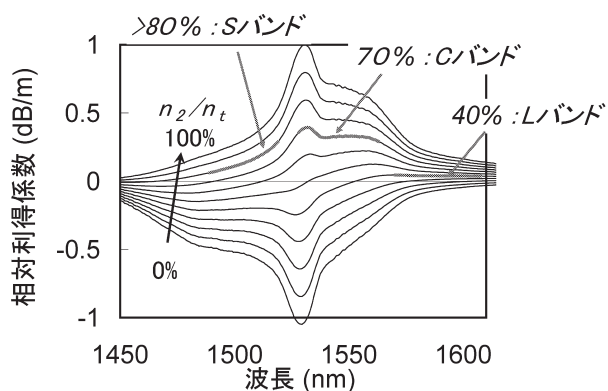


図2 EDF の相対利得係数スペクトルの反転分布率 n_2/n_t の依存性。

さて、現在注目されている C バンド EDFA の技術課題は、波長数や波長配置が変動した場合の利得波長特性変動の抑圧である⁷⁻¹¹⁾。OADM (optical add-drop multiplexers) によって、波長数が大きく変化するメトロコア領域に、DWDM システムの導入が進められている。波長数や波長配置が大幅に変化した場合、波長平坦性を保つことが難しい。この現象は EDF のスペクトラルホールバーニング現象と考えられていたが¹¹⁾、最近まで、その研究成果に大きな進展がなかった。しかし、波長を挿抜する機能の OADM、OXC (optical cross connects) HUB ノードなどを多用することが検討されている現在、システムへの影響が無視できないことから、スペクトラルホールバーニングの解明が活発になってきている。

L バンド EDFA の技術課題として、四光波混合クロストークの抑圧検討^{12,13)}、短尺化検討¹⁴⁻¹⁶⁾、効率改善のための励起構成検討¹⁷⁾などが議論されている。

1.3 S バンド EDFA

前述してきた C バンド EDFA や L バンド EDFA に適用された EDF は十分な実績があり、この EDF を用いた S バンド増幅の検討が行われている¹⁸⁻²¹⁾。図 2 からわかるように、EDF においても、80% 以上の n_2/n_t では S バンド領域で利得が得られることがわかる。しかしながら、S バンド領域の利得を得るためには、S バンドより大きな利得係数をもつ C バンドの自然放出光の成長 (ASE: amplified spontaneous emission) に励起光パワーが費やされることを阻止しなければならない。ASE 抑圧方法として 2 つの方法が提案されており、1 つが ASE 抑圧フィルターを EDF の間に複数段配置する方法^{18,20)}、もう 1 つが EDF の屈折率プロファイルによって ASE を抑圧する方法である^{19,21)}。

前者の光増幅器の構成は、EDF と ASE 抑圧フィルター

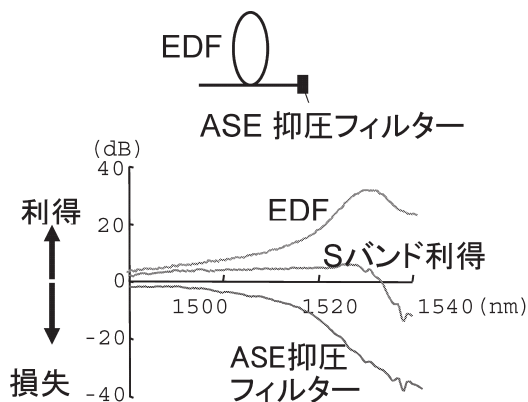


図3 SバンドEDFAの基本ユニット構成と利得/損失特性.

の組み合わせが基本ユニットとなる。この基本ユニットの特性を図3に示す。ASE抑圧フィルタが1530 nmで30 dB以上の損失をもつことによってEDFの1530 nmのASEが抑圧され、Sバンド領域で利得が得られることがわかる。実効的な利得を得るために、SバンドEDFAは図4に示すように、基本ユニット4段とEDF1段を組み合わせ、 n_2/n_1 を高く保つための980 nm双方向励起が用いられる¹⁸⁾。用いたEDFの組成と濃度は $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ と1000 ppm・wtであり、一般に用いられているEDFである。なお、各段のEDF長は4.5 mである。波長1489.3~1518.7 nm、100 GHz間隔40 chの増幅スペクトルとNFのスペクトルを図5に示す。入力信号光パワーは-20 dBm/chである。最大利得25 dB、平均雑音指数6 dBが得られている。しかしながら、大きな利得偏差が発生している様子が見られる。これは、ASE抑圧フィルタの損失スペクトルとEDF利得スペクトルとのミスマッチによるものである。ASE抑圧フィルタの設計・製造精度向上により解決できるものと考えられる。また、各基本ユニットを980 nm励起し、それを9つ、利得等化フィルタを2つ用いて、利得21 dB以上、利得偏差1.9 dB以下、NF 6.7 dB以下が達成されたと報告されている²²⁾。一方で、EDFの材料からの取り組みも報告されており、Al共ドープEDFとP/Al共ドープEDFを比較し、P/Al共ドープEDFを用いることで、9 dBの利得増加が得られている²⁰⁾。

EDFの屈折率プロファイルによるASE抑圧方法では、Arboreらは、EDFの屈折率プロファイルについて、ダブルクラッド型またはW型と称されるdepressed-cladding構造を提案している。1525 nm以上の長波長領域の基本伝播モード損失を100 dB以上に設計したEDFを用いてSバンドEDFAを構成し、最大利得36 dB、最大出力11 dBmが得られている¹⁹⁾。EDFのコア組成は2.5% GeO_2 、

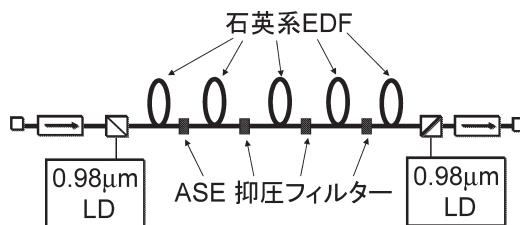


図4 EDFとASE抑圧フィルタの基本ユニット4段とEDF1段から構成されるSバンドEDFAの構成.

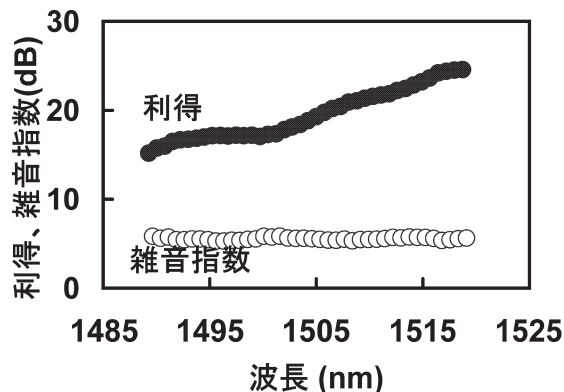


図5 SバンドEDFAの利得と雑音指数スペクトル (入力信号光パワー-20 dBm/ch).

5.5% Al_2O_3 、92% SiO_2 であり、Er濃度は0.15 wt%、コア径4 μm 、コアと第1クラッドの開口数は0.22である。その後、EDFとEDFA構成を改良することで、1510~1490 nm間の利得偏差が20 dBから7 dBに改善している²¹⁾。

両タイプのSバンドEDFAの課題は効率改善である。depressed-cladding EDFとASE抑圧フィルタの組み合わせや、その構成の最適化などによる改善についても期待したいところである。

2. 超広帯域分布ラマン増幅器

ラマン増幅とは、透明な物質に強い光(励起光)を入射すると、ラマンシフト量だけ離れた波長に誘導ラマン散乱を誘発し光増幅を行う現象である。増幅媒体に光の閉じ込め効果の高いシングルモード光ファイバーを用いることで、波長分割多重伝送に要求される利得を得ることができる。石英ガラスのラマンシフト量は13.2 THzであり、励起波長周波数から、 ± 13.2 THzに散乱スペクトルを観測することができる。 -13.2 THzへのシフトつまり長波長側へのシフトをストークス散乱、 $+13.2$ THzへのシフトつまり短波長側へのシフトをアンチストークス散乱と呼ぶが、アンチストークスシフトは弱いことから、ラマン増幅にはもっぱらストークスシフトの誘導散乱光が用いられて

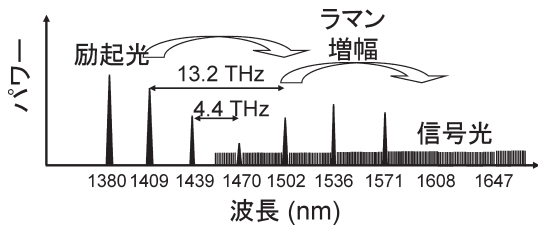


図6 交互配置分布ラマン増幅器の励起光と波長多重信号光の配置例。

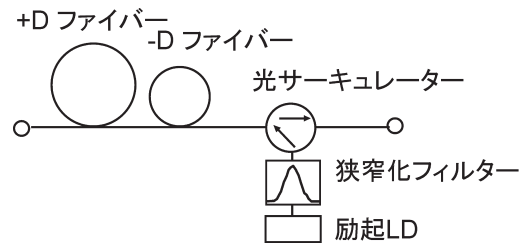


図7 交互配置分布ラマン増幅器の構成。

いる。1550 nm 帯の信号光を増幅しようとする場合、およそ 100 nm 短波長側に励起光を配置することになる。内藤らは、励起波長と信号光を交互に配置することで増幅帯域幅 202 nm を実現する、交互配置分布ラマン増幅器を提案した⁴⁾。

冒頭に述べた 3 つの光増幅器を用いたマルチバンド伝送を行う場合、光増幅中継器の入力側と出力側に分波器と合波器を挿入する必要がある。ここでは、入力側の分波器による雑音特性の劣化、出力側の合波器による信号光パワーの低減という問題がある。これに対し、分波器・合波器を必要とせず分布的に増幅する交互配置分布ラマン増幅器は、雑音性や広帯域性を兼ね備えた光増幅器といえる。

交互配置分布ラマン増幅器の波長多重信号光と励起光の配置例を図 6 に示す²³⁾。励起光は、ラマンシフト量の整数で割った周波数ごとに配置する。励起光がラマンシフト量分だけ離れた励起光をラマン増幅し、かつ出力平坦性を保つために、この励起光波長の間にも励起光を配置するルールになっている。図 6 は整数を 3 にした場合である。交互配置分布ラマン増幅器の構成を図 7 に示す。ラマン増幅媒体となる正分散ファイバーと負分散ファイバーを組み合わせた伝送路、広帯域光サーキュレーター、ラマン励起光源と励起光スペクトルを狭める狭帯域フィルターから構成される。その利得波長特性を図 8 に示す。有効な信号光波長帯域幅は 201.81 nm、平均利得 10 dB、利得偏差 3 dB であった。また、この交互配置分布ラマン増幅器を用いて、4.32 Tbit/s・120 km の伝送を達成しており、この超広帯域化技術より 1000 波多重伝送の可能性を示している。

S バンドへの帯域拡大のための S バンド EDFA と、超広帯域光増幅器について述べてきた。超広帯域光増幅器の交互配置分布ラマン増幅器は、伝送路をマネージメントできる海底システムの中継増幅器には有用であるものの、任意種類の伝送路と伝送距離となる陸上系に適用することが難しい技術である。また、ラマン増幅器には、励起効率が小さいこと、ダブルレイリー散乱によるクロストークの増大、非線形性の増大など、数多くの課題がある。陸上シス

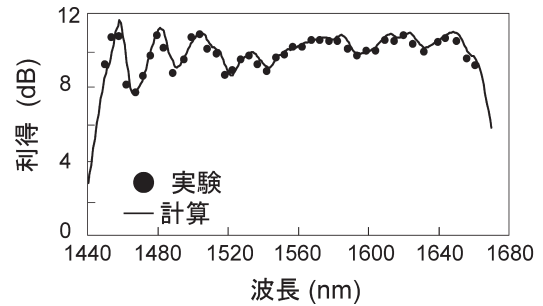


図8 交互配置分布ラマン増幅器の利得波長特性。

テムには希土類ドープファイバー増幅器とラマン増幅器のハイブリッド構成が適しているとの見方もされているが、今後は、増幅帯域幅が 30~40 nm の希土類ドープファイバー増幅器と、低雑音特性と超広帯域特性の両面をもつラマン増幅器のすみ分けが必要となる。

3. 半導体光増幅器の広帯域化

最後に、1470~1610 nm を 20 nm 間隔で信号光を配置する、CWDM (coarse WDM) 用光増幅器として期待される半導体光増幅器^{24,25)} について紹介しておきたい。最近の半導体光増幅器開発の進展はめざましく、①量子ドット光増幅器では 120 nm 帯域幅で 20 dB 以上の増幅利得、7 dB 以下の雑音指数、19 dBm 以上の飽和出力を実現しており²⁴⁾、また②MQW 光半導体増幅器では、同様に 120 nm 帯域幅で 4.5 dB 以下の雑音指数、19 dBm 以上の飽和出力を記録している²⁵⁾。両光増幅器ともに、消費電力の低減と偏波依存性の低減が課題である。また、波長分割多重伝送装置への適用も視野に入れた低雑音化、高出力化にも期待したい。

総務省から、「次世代 IP インフラ研究会・第一次報告書・国内のバックボーンの現状と課題」が 2004 年 6 月 7 日に発表された。日本三大 IX (Internet eXchange) の公開情報と、ある前提のもとにトラフィックの伸びを試算している。それによると、2008 年末には現在のトラフィック

の5倍～6倍の水準に達すると報告している。また、さらに新しい利用方法の登場や、ヒト対モノ、モノ対モノの通信が普及した場合には、さらに大きな延びになると試算している。この資料は、幹線系の大容量化の流れが再び現れることを予測している。その大容量化を実現する手段として、帯域拡大なのか、波長多重の高密度化なのか、ビットレートの高速化なのか、より安く・使いやすい技術から適用されていだろうか。光増幅器にとっては、帯域拡大のみならず、高出力化・低非線形化、低雑音化という課題も抱えている。これらの課題解決に向けた現実的な取り組みに期待したい。

文 献

- 1) 三木哲也：“WDM 通信システムとフォトニックネットワークの展望”，昭和電線レビュー，**51** (2001) 6-11.
- 2) 山口伸英，渡辺茂樹：“フォトニックシステム”，FUJITSU，**52** (2001) 299-307.
- 3) K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasahara and T. Ono: “10.92 Tb/s (273×40 Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical repeated transmission experiment,” *OFC 2001*, PDP24 (2001).
- 4) T. Tanaka, K. Torii, M. Yuki, H. Nakamoto, T. Naito and I. Yokota: “200-nm bandwidth WDM transmission around 1.55 μm using distributed Raman amplifier,” *ECOC 2002*, PD 4.6 (2002).
- 5) H. Ono, M. Yamada and Y. Ohishi: “Gain flattened Er³⁺-doped fiber amplifier for a WDM signal in the 1.57-1.60 μm wavelength region,” *IEEE Photonic Technol. Lett.*, **9** (1997) 596-598.
- 6) M. Jinno, T. Sakamoto, J. Kani, S. Aisawa, K. Oda, M. Fukui, H. Ono, M. Yamada and M. Oguchi: “1580 nm band, equally spaced 8×10 Gb/s WDM channel transmission over 360 km (3×120 km) of dispersion-shifted fiber avoiding FMW impairment,” *Trend Opt. Photonics*, **16** (1997) 325-328.
- 7) D. G. Foursa, A. N. Pilipetskii, D. Kovsh, M. Nissov and S. M. Abbott: “Experimental observation of the complex shape of spectral holes in erbium-doped silica fiber,” *OAA 2003*, TuD2 (2003) 201-203.
- 8) M. Nishihara, Y. Sugaya and E. Ishikawa: “Characterization and new numerical model of spectral hole burning in broadband erbium-doped fiber amplifier,” *OAA 2003*, TuD3 (2003) 204-206.
- 9) M. Nishihara, Y. Sugaya and E. Ishikawa: “Impact of spectral hole burning in multi-channel amplification of EDFA,” *OFC 2004*, FB1 (2004).
- 10) F. A. Flood: “Gain saturation behavior in L-band EDFAs,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **12** (2000) 1156-1158.
- 11) E. Desurvire, J. L. Zyskind and J. R. Simpson: “Spectral gain hole-burning in erbium-doped fiber amplifiers,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **2** (1990) 246-248.
- 12) K. Aiso, Y. Moriai, N. Shibayama, T. Nakamura and T. Yagi: “Extremely low nonlinear Er, La co-doped fiber suitable for L-band amplifier,” *OAA 2002*, OTuC3 (2002).
- 13) T. Haruna, M. Kakui, M. Takagi, M. Tanaka and S. Ishikawa: “Ultra-low nonlinearity EDFAs employing multimode EDF with effective mode area of 81 μm^2 ,” *OAA 2004*, OTuA2 (2004).
- 14) A. J. G. Ellison, J. E. Dickinson, D. E. Goforth, D. L. Harris, J. T. Kohli, J. D. Minelly, B. N. Samson, J. K. Trentelman and M. J. Yadlowsky: “Hybrid erbium silicate conventional-band fiber amplifier with ultra-low gain ripple,” *Trend Opt. Photonics*, **30** (1999) 51-56.
- 15) B. O. Guan, H. Y. Tam, S. Y. Liu, P. K. A. Wai and N. Sugimoto: “Ultrawide-band La-codoped Bi₂O₃-based EDFA for L-band DWDM systems,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15** (2003) 1525-1527.
- 16) Y. Kubota, T. Teshima, N. Nishimura, S. Kanto, S. Sakaguchi, Z. Meng, Y. Nakata and T. Okada: “Novel Er and Ce codoped fluoride fiber amplifier for low-noise and high-efficient operation with 980-nm pumping,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15** (2003) 525-527.
- 17) F. R. M. Adikan, A. S. M. Noor and M. A. Mahdi: “Optimum pumping configuration for L-band EDFA incorporating ASE pump source,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2004) 1465-1467.
- 18) E. Ishikawa, M. Nishihara, Y. Sato, C. Ohshima, Y. Sugaya and J. Kumasako: “Novel 1500 nm-band EDFA with discrete Raman amplifier,” *ECOC 2001*, PD.A.1.2 (2001).
- 19) M. A. Arbore, Y. Zhou, G. Keaton and T. Kane: “36 dB gain in S-band EDFA,” *OAA 2002*, PDP4 (2002).
- 20) M. Kakui, M. Takagi, S. Endo, S. Ishikawa and M. Shigematsu: “S-band optical amplification employing silica-based phosphorous/alumina-codoped EDF,” *OFC 2004*, FB3 (2004).
- 21) M. Arbore, Y. Zhou, H. Thiele, J. Bromage and L. Nelson: “S-band erbium-doped fiber amplifier for WDM transmission between 1488 and 1508 nm,” *OFC 2003*, WK2 (2003).
- 22) H. Ono, M. Yamada and M. Shimizu: “S-band erbium-doped fiber amplifiers with a multistage configuration—design, characterization, and gain tilt compensation,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, **21** (2003) 2240-2246.
- 23) 内藤崇男：“202 nm 広帯域光増幅器を用いた大容量伝送システム”，電子情報通信学会論文誌 (B)，**J87-B** (2004) 471-477.
- 24) T. Akiyama, M. Ekawa, M. Sugawara, H. Sudo, K. Kawaguchi, A. Kuramata, H. Ebe, K. Morito, H. Imai and Y. Arakawa: “An ultrawide-band (120 nm) semiconductor optical amplifier having an extremely-high penalty-free output power of 23 dBm realized with quantum-dot active layers,” *OFC 2004*, PDP12 (2004).
- 25) K. Morito, S. Tanaka, S. Tomabechei and K. Kuramata: “A broadband MQW semiconductor optical amplifier with high saturation output power and low noise figure,” *OAA 2004*, PD1 (2004).

(2004年8月11日受理)