

# 導波路型光増幅器

日本電信電話株式会社 堀口 正治



## Planar Waveguide Optical Amplifiers

Masaharu Horiguchi

NTT Opto-electronics Laboratories

### Abstract

State of the art rare-earth doped planar waveguide optical amplifier technologies are reviewed focusing on research at NTT Opto-electronics Labs. Optical amplification was successfully demonstrated in Er-doped silica-based planar waveguides fabricated by FHD and RIE techniques. It was found that the optimum erbium concentration is around 0.5 wt% for the  $P_2O_5$ -codoped silica waveguides. A fiber pigtailed Er-doped planar waveguide amplifier was successfully fabricated based on this result. The waveguide is 36 cm long and has an Er-concentration of 0.48%. The waveguide amplifier exhibited a gain of 24 dB and a signal output of 11 dBm at 1533 nm which are the highest values reported so far, and a low noise figure of 3.8 dB. Er-doped planar waveguide amplifiers and their applications will lead to new developments in planar lightwave circuits (PLC) and optical integrated circuits.

### 1. はじめに

近年、エルビウム(Er)添加光ファイバ増幅器(Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA)が長足の進歩を示し、光通信や光エレクトロニクス技術に大きな技術革新をもたらそうとしている。光増幅技術は、エレクトロニクス分野におけるトランジスタ技術に相当するものであり、その実現は光通信の研究者にとって長年の夢であった。現在、既に実用の段階にある光ファイバ増幅器は、増幅媒体となるEr添加光ファイバ、WDM光回路、光アイソレータなどの光部品が複合実装されて作製されるが、最近この技術を発展させ、単一基板上の光集積回路(導波路型光増幅器)として実現しよ

うとする研究が活発化している。導波路型光増幅器が実現されれば、光増幅器の超小型化や経済化のほか、これまで、受動光部品主体で構成されていたPLC(Planar Lightwave Circuits)に光増幅素子を組み込むことが可能となり、PLCの機能を飛躍的に拡大できるものと期待されている。

本解説では、Er添加石英系導波路型光増幅器を中心に、研究開発の現状について報告する。

### 2. 導波路型光増幅器の研究経緯

希土類添加ガラスをレーザホスト(光増幅媒体)として応用する研究は、1960年代にShitzerらによって初めて報告された<sup>1)</sup>。そして、導波路型光増幅器や導波路型レーザの初期の研究は、1970年代の前半、NTTやコーネル大学などで、Nd添加光導波路を対象に行われた<sup>2),3)</sup>。しかし、その後、長

い中断があり、再びこの研究が活発化したのは、光ファイバ増幅器が脚光を浴び始めた1980年代後半のことであった。近年における光ファイバ増幅器(EDFA)の飛躍的な進歩は、光導波回路の研究者にも大きな刺激を与えることとなり、希土類添加光導波路やその応用部品の研究に大きな技術進展を促した<sup>4)~9)</sup>。

現在までに報告されている希土類添加光導波路をホスト材料別に分類すれば、ガラス材料系で

は、石英系ガラスおよび多成分ガラス(ボロシリケートガラス、ソーダ石灰ガラス、磷酸ガラスなど)があり、結晶材料系では、 $\text{LiNbO}_3$ がある。Table 1に、Er添加ガラス導波路に関する主な研究報告をまとめて示した。

### 3. 希土類添加石英系光導波路の作製

光ファイバ増幅器と導波路型光増幅器とを比較してみると、後者には、素子の作製上大きな制約

Table 1 Recent Reports on Er-doped Planar Waveguide Devices

| Device              | Glass Material                                           | Fabrication Process                  | Operating Wavelength (nm) | Laser Output (nW) | Signal Gain (dB) | Research Organization (year)                 | Ref.        |
|---------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------|------------------|----------------------------------------------|-------------|
| Laser               | $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Er}$ on silicon | FHD+RIE                              | 1604                      | 1.2               | —                | NTT Opt0-Electronics Labs. (1991)            | (15)        |
| Laser               | Er-doped BK7 glass                                       | Ion Exchange                         | 1540                      | 0.4               | —                | Univ. Southampton (1992)                     | (16)        |
| Amplifier           | $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Er}$ on silicon | FHD+RIE                              | 1535                      | —                 | 13.7             | NTT Opt0-Electronics Labs. (1992)            | (4)         |
| Ring Laser          | $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Er}$ on silicon | FHD+RIE                              | 1535                      | 2.7               | —                | NTT Opt0-Electronics Labs. (1992)            | (6)         |
| Laser               | $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-Er}$ on silica glass    | EB deposition + RIE                  | 1530                      | 2.0               | —                | NTT Telecom. Field Systems R&D Center (1992) | (9)         |
| Amplifier           | Tl-doped silicate glass                                  | Ion Exchange                         | 1540                      | —                 | 0.5              | Corning Europe (1993)                        | (17)        |
| Amplifier           | Er-doped Soda-lime glass on silicon                      | RF-sputtering + silicon gel cladding | 1537                      | —                 | 15               | ATT (1993)                                   | (8)         |
| Amplifier           | $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Er}$ on silicon | FHD+RIE                              | 1533                      | —                 | 23               | NTT Opt0-Electronics Labs. (1993)            | (18)        |
| Amplifier and Laser | $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Er}$ on silicon | PCVD+FHD + RIE                       | 1533                      | 2.8               | 5.0              | NTT Opt0-Electronics Labs. (1993)            | (7)<br>(19) |
| Amplifier Module    | $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Er}$ on silicon | FHD+RIE                              | 1533                      | —                 | 24               | NTT Opt0-Electronics Labs. (1993)            | (12)        |

があることがわかる。それは、増幅媒体となる導波路長(ファイバ長)に大きな違いが存在する点である。光ファイバ増幅器の場合ファイバ長は、通常、数mから数百mまで許容されるが、導波路型光増幅器では、数cm角の基板上に作製できる導波路長は、高々数十cm程度に制約されることから、導波路型光増幅器で十分な利得を得るには、数千ppm以上の高濃度の希土類元素を添加することが必要となる。しかし、一般に、希土類元素が高濃度に添加されたガラスでは、希土類のクラスタが発生し易くなり、増幅効率の著しい低下(濃度消光)をもたらすことが知られている。また、この種のガラスでは、アップコンバージョン過程に起因する増幅効率の低下を生じることが明かにされている。

こうした技術的背景から、高利得の導波路型増幅器を実現するためには、クラスタの発生を抑制し均一な希土類添加導波路膜を作製することが重要であり、これまでに、様々な光導波路作製法が検討されている。希土類添加光導波路の作製技術には、スパッタリング法<sup>3)</sup>、イオン交換法(イオン拡散法)<sup>2)</sup>、FHD(Flame Hydrolysis Deposition)法<sup>4)</sup>、電子ビーム蒸着法<sup>5)</sup>およびプラズマCVD法<sup>7)</sup>などが報告されている。以下では、現状で最も高利得の導波路型光増幅器が得られているFHD法に着目し、その作製法について解説する。

Fig. 1は、FHD法とRIE(Reactive Ion Etching)技術を用いた希土類添加光導波路作製工程の概念

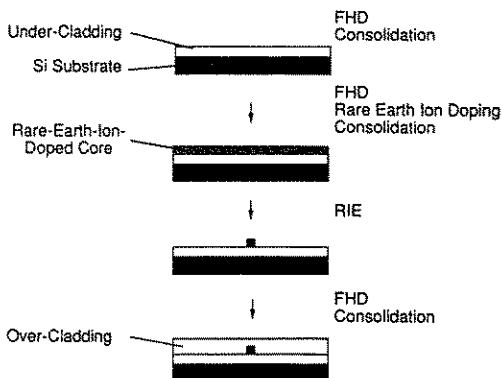
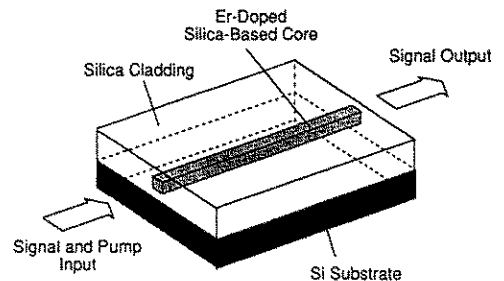


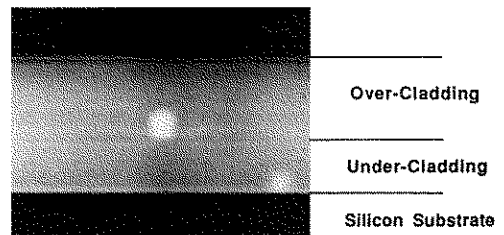
Fig. 1 Fabrication stages of rare-earth-doped silica-based waveguides using FHD and RIE techniques.

図を示す。本作製法は、基本的には標準的なPLCの作製工程と同様であり、これに希土類添加工程が加わったものである。基板材料には、シリコン(Si)ウェハが用いられる。まず、Si基板上に約20  $\mu\text{m}$ 程度の厚さのアンダークラッドガラス膜が形成され、このガラス膜上にさらに希土類を含むコアガラス膜が形成される。コアガラス膜の厚さは、約6  $\mu\text{m}$ 程度である。ここに、希土類添加には、たとえば、液浸法が用いられる。つづいてコア周辺部を除去するためのエッチング工程(RIE)を経て、最後に全面にクラッドガラス膜が形成される。ここに、コアガラスには、所定の比屈折率差を得ると同時にクラスタの低減を図るため、りん( $\text{P}_2\text{O}_5$ )などを共添加したガラス組成( $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Er}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Nd}$ )が用いられる。コアとクラッド間の非屈折率は、0.5~1.2%程度と比較的大きく設定されており、光励起効率の向上とともに<sup>10)</sup>、光導波路の曲げ損失の低減が図られている。

Fig. 2(a)に、導波路型光増幅回路の概念図を、Fig. 2(b)に、FHD法により作製されたNd



(a) Basic structure of a silica-based planar waveguide amplifier.



(b) Cross-sectional photograph section of a  $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$  Nd-doped planar waveguide.  
Fig. 2

添加光導波路のコア断面顕微鏡写真の例を示す。ここに、Nd 添加量は、0.2 Wt%，コア・クラッド間の比屈折率差は 0.5%，コア断面形状は、 $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$  である。

#### 4. Er 添加石英系導波路型光増幅器の特性

先に述べたように、導波路型光増幅器の高利得化には、クラスタの発生の少ないホスト材料の開発と、希土類添加濃度および導波路長の適正化が重要である。

NTT 光エレクトロニクス研究所の北川らは、 $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Er}$  系のホスト材料について、アップコンバージョン過程<sup>11)</sup>が利得劣化に及ぼす影響について解析し、Er 添加濃度と所要の利得を与える導波路長の関係を理論的に求めた<sup>12)</sup>。Fig. 3 にその解析結果を示す。Fig. 3 から、たとえば、利得 20 dB を得ようとするとき Er 添加濃度には上限が存し、0.7 wt% 以下にする必要があることが分かる。このとき、最適な Er 濃度は約 0.5 wt% であり、Er 添加導波路長約 27 cm で最大利得 20 dB が得られることを示している。このように、高濃度の Er を添加した光導波路では、アップコンバージョン過程を考慮した光増幅器の設計が必須であり、単に Er 濃度を上げる（結果的に導波路長を短くできる）だけでは高利得を得ることは困難である。以下に示すように、所要の利得に対して

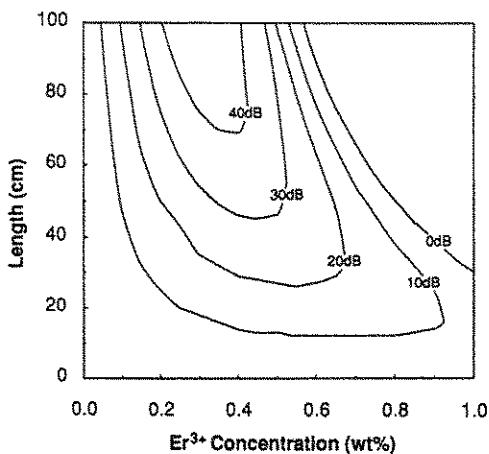


Fig. 3 Computed relation between the waveguide length required for given gain values and erbium concentration with the co-operative upconversion process.

最適な Er 添加濃度を選定する必要がある。

Fig. 4 に、Er 添加濃度と利得の関係について測定結果と計算結果を比較して示す。測定および計算に使用した導波路長は 19 cm、励起光強度は 100 mW、信号光の波長は 1533 nm である。利得の数値解析には、アップコンバージョン過程による反転分布の減少を考慮にいたした 3 準位レーザ遷移レート方程式を用いている。Fig. 4 に示すように、Er 濃度 0.5 wt% 以下の領域では、Er 濃度の増加に伴い利得が単純増加の傾向を示す一方、Er 濃度 0.5 wt% 以上においては、Er 濃度の増加にともない利得は急激に減少することが分かる。こうした利得の減少傾向には、実験値と計値値に非常に良い一致がみられることから、Er を高濃度に添加したときの利得劣化は、アップコンバージョン過程に起因することを裏付けるものと考えられている。事実、Er を高濃度に添加した石英系導波路膜においては、蛍光寿命の大幅な短縮が確認されている。

以上の検討結果にもとづいて、Er 添加導波路型光増幅器モジュールを作製した。この測定系を Fig. 5 に、得られた利得特性を Fig. 6 に示す<sup>12)</sup>。Er 添加濃度は 0.48 wt%，光導波路長は 36 cm で

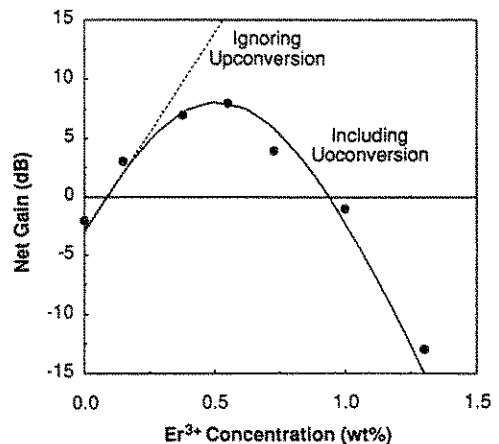


Fig. 4 Erbium concentration dependent small signal gain. Filled circles and lines indicate measured and computed data, respectively. The solid line is computed taking account of the upconversion process. The dashed line is computed ignoring the upconversion process.

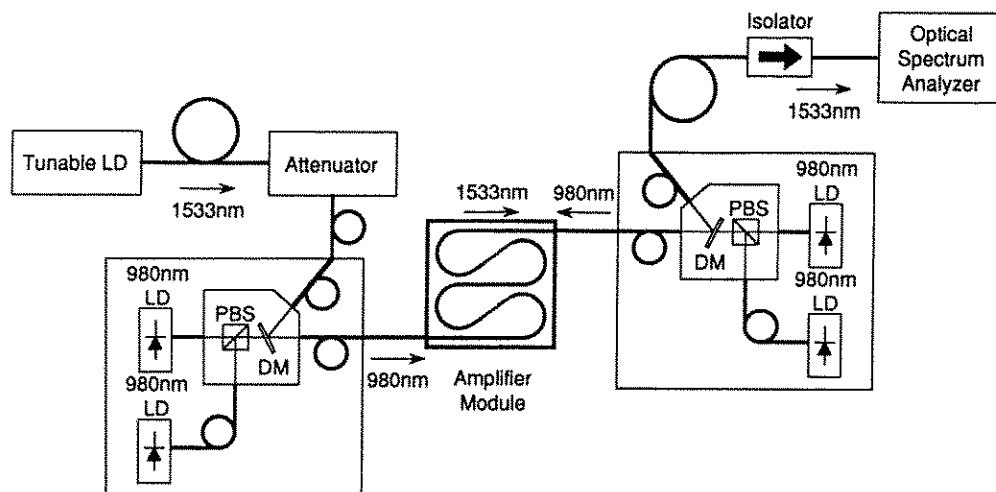


Fig. 5 Experimental setup for measuring the amplification characteristics of a single-mode fiber-pigtailed Er-doped planar waveguide.

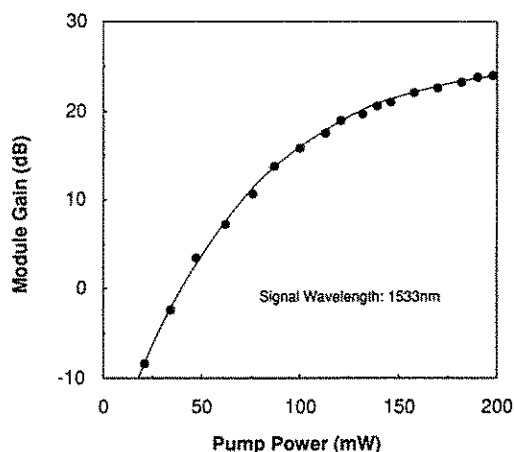


Fig. 6 Pump power dependent small signal gain at 1533 nm.

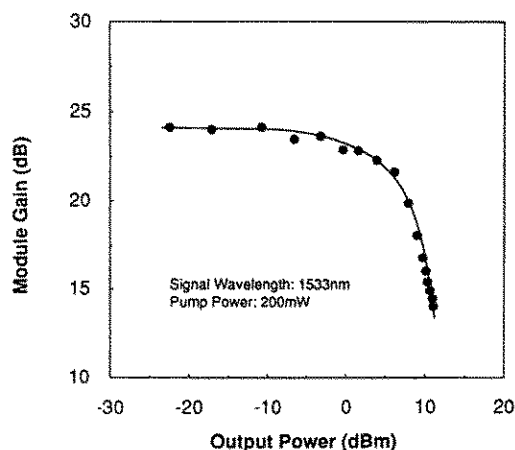


Fig. 7 Output power dependent gain at 1533 nm.

ある。ここに、光導波路の入出力端には、単一モード光ファイバが実装されている。励起光源は波長 980 nm の半導体レーザである。測定の結果、利得 0 dB を与える励起光強度しきい値は、39 mW にまで低減されていることが分かる。さらに、励起光強度 200 mW において、利得 24 dB が達成された。この値は、これまで報告された Er 添加導波路型光増幅器の中で最大のものである。

Fig. 7 に励起光強度 200 mW における利得の飽和特性を示す。利得が 3 dB 低下時の飽和出力 7.0 dBm, 最大信号出力 11 dBm が得られている。

Fig. 8 は、上記の Er 添加導波路型光増幅器モジュールを前置増幅器として使用し、波長 1536 nm, 伝送速度 2.5 Gb/s の NRZ ランダム光パルス信号を受信したときの符号誤り率特性を示す。Fig. 8 において、Er 添加導波路型光増幅器の利得 19 dB, 受信光回路の過剰損失 5.6 dB のとき、光信号の受信感度は、前置増幅器を使用しない場合と比較して 6.4 dB 改善されていることが分かる。このように、Er 添加導波路型光増幅器は、実用に近い条件下において十分な低雑音性を示すことが実証されている。なお、この Er 添加光導波路

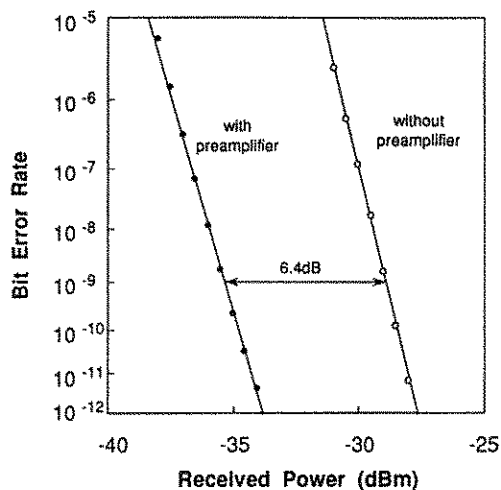


Fig. 8 Bit error rate characteristics of an Er-doped planar waveguide preamplifier.

の雑音指数は、ASE (Amplified Spontaneous Emission) 雑音測定法<sup>13)</sup>による測定の結果、波長 1533 nm で 3.8 dB であった。

## 5. まとめ

将来の光増幅器技術の有力候補として、最近注目を浴びている導波路型光増幅器の開発現状について解説した。ここ数年の光ファイバ増幅器 (EDFA) の急速な進歩をうけて、導波路型光増幅器の研究が世界各国で活発に行われるようになった。現状で、導波路型光増幅器は、ようやく 20 dB を越える利得の発現を確認した段階にあるが、その優れた基本計能は既に EDFA において実証されており、今後の研究によって、なお一層の性能向上が期待できよう。また、導波路型光増幅器の具体的な応用回路については、今回は、紙面の都合で割愛させていただいたが、既に導波路型リング共振器 (リングレーザ)<sup>6)</sup>、無損失光分配回路、導波路型波長可変レーザ<sup>14)</sup>、Q スイッチレーザ等が実現されている。

残された課題としては、Er 添加光導波路の増幅特性の改良とともに、WDM 光回路の集積化、励起用 LD やアイソレータなどの周辺部品の複合実装など、広範な光集積技術の確立が挙げられよう。今後、導波路型光増幅器とその応用回路が、

PLC 受動部品を始めとする関連する光部品およびそれら相互の集積化技術の向上と相まって、さらに発展することを期待したい。

## 謝辞

本解説を執筆するにあたり、一連の希土類添加光導波路の研究について有益な討論を頂いた北川毅主任研究員、服部邦典研究主任、首藤啓三主任研究員および小熊学社員に感謝致します。さらに、Er 添加光導波路の作製にご協力頂いた安光保研究主任、小野瀬勝秀主任研究員、岡崎久晃研究主任および導波路作製に有益な討論を頂いた大森保治主幹研究員、小湊俊海研究主任に感謝致します。また、終始有益な助言を頂いた中原基博光複合部品研究部部長、伊澤達夫光エレクトロニクス研究所所長に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) E. Snitzer and R. Woodcock, "Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup> glass laser", Appl. Phys. Lett., Vol. 6, pp. 45-46 (1965).
- 2) M. Saruwatari and T. Izawa, "Nd-glass laser with three-dimensional optical waveguide", Appl. Phys. Lett., Vol. 24, No. 12, pp. 603-605 (1974).
- 3) B. Chen and C. L. Tang, "Nd-glass thin-film waveguide: An active medium for Nd thin-film laser", Appl. Phys. Lett., Vol. 28, No. 8, pp. 435-437 (1976).
- 4) T. Kitagawa, K. Hattori, K. Shuto, M. Yasu, M. Kobayashi and M. Horiguchi, "Amplification in erbium-doped silica-based planar lightwave circuits", in Proc. of OAA' 92, PD-1, Th PD II. 5, pp. 907-910 (1992).
- 5) K. Hattori, T. Kitagawa, M. Oguma, M. Wada, J. Temmyo and M. Horiguchi, "Erbium-doped silica-based planar waveguide amplifier pumped by 0.98  $\mu$ m laser diodes", Electron. Lett., vol. 29, pp. 357-359 (1993).
- 6) T. Kitagawa, K. Hattori, Y. Hibino, Y.

- Ohmori and M. Horiguchi, "Laser oscillation in Er-doped silica-based planar ring resonator", in Proc. of ECOC' 92, pp. 907-910 (1992).
- 7) K. Shuto, K. Hattori, T. Kitagawa, Y. Ohmori and M. Horiguchi, "Erbium-doped phosphosilicate glass waveguide amplifier fabricated by PECVD", Electron. Lett., vol. 29, pp. 139-141 (1993).
  - 8) J. Shmulovich, V. H. Wong, G. Nykolak, P. C. Becker, R. Adar, A. J. Bruce, D. J. Muehlner, G. Adams and M. Fishteyn, "15 dB net gain demonstration in Er<sup>3+</sup> glass waveguide amplifier on silicon", in Proc. of OFC' 93, PD-18, pp. 75-78 (1993).
  - 9) M. Nakazawa and Y. Kimura, "Electronbeam vapour-deposited erbium-doped glass waveguide laser at 1.53  $\mu$ m", Electron. Lett., vol. 28, pp. 2054-2056 (1992).
  - 10) M. Shimizu, M. Yamada, M. Horiguchi, T. Takeshita and M. Okayasu, "Erbium-doped fiber amplifiers with an extremely high gain coefficient of 11.0 dB/mW", Electron. Lett., Vol. 26, No. 20, pp. 1641-1642 (1990).
  - 11) B. J. Ainslie, S. P. Craig-Ryan, S. T. Davey, J. R. Armitage, C. G. Atkins and R. Wyatt, "Optical analysis of Erbium doped fibers for efficient lasers and amplifiers," in Proc. of IOOC' 89 20 A 3-2 (1989).
  - 12) T. Kitagawa, K. Hattori, K. Shuto, M. Oguma, J. Temmyo, S. Suzuki, and M. Horiguchi, "Erbium-doped silica-based planar amplifier module pumped by laser diodes", in Proc. of ECOC' 93, ThC 12.11, pp. 41-44 (1993).
  - 13) C. R. Giles, E. Desurvire, J. L. Zyskind and J. R. Simpson, "Noise performance of erbium-doped fiber amplifier pumped at 1.49  $\mu$ m, and application to signal preamplification at 1.8 Gbits/s", IEEE Photn. Technol. Lett., Vol. 27, pp. 146-148 (1989).
  - 14) M. Oguma, T. Kitagawa, K. Hattori, and M. Horiguchi, "Y-branched Er-doped silica-based planar waveguide laser", in Proc. of MOC/GRIN' 93, Kawasaki, pp. 112-115 (1993).
  - 15) T. Kitagawa, K. Hattori, M. Shimizu, Y. Ohmori and M. Kobayashi, "Guided-wave laser based on erbium-doped silica planar lightwave circuit", Electron. Lett., Vol. 27, No. 4, pp. 334-335 (1991).
  - 16) T. Feuchter, E. K. Mwarania, J. Wang, L. Reekie, and J. S. Wilkinson, "Erbium-doped ion-exchanged waveguide lasers in BK-7 glass", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 4, No. 6, pp. 542-544 (1992).
  - 17) D. Troughet, A. Beguin, P. Laborde, and C. Lermniaux, "Er<sup>3+</sup> glass waveguide amplifier using the ion-exchange technique", in Proc. OFC/IOOC' 93, WG 9, pp. 106-107 (1993).
  - 18) T. Kitagawa, "Rare-earth-doped planar waveguide amplifiers", in Proc. OAA' 93, MC 1, pp. 136-139 (1993).
  - 19) K. Shuto, K. Hattori, T. Kitagawa, and M. Horiguchi, "Single-mode waveguide amplifier and laser in erbium-doped glass waveguide fabricated by PECVD", in Proc. of ECOC' 93, MoP 2.3, pp. 53-56 (1993).

#### 【筆者紹介】

堀口 正治 (ほりぐち まさはる)

昭和44年 茨城大・工学部・電子工学科卒

昭和46年 同大学修士課程修了

同年 日本電信電話公社入社 以来、石英系光ファイバの研究に従事

昭和56年 工博(東京大学)

現在 日本電信電話株式会社 光エレクトロニクス研究所勤務、光増幅技術に関する研究に従事、応用物理学会、電子情報通信学会、IEEE 各会員。