

# 解説

## 光ファイバ増幅器

堀口 正治

NTT 光エレクトロニクス研究所光複合部品研究部 〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 162

(1990年1月25日受理)

### Optical Fiber Amplifier

Masaharu HORIGUCHI

NTT Opto-Electronics Laboratories, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-11

#### 1. はじめに

近年、希土類元素を添加した石英系単一モード光ファイバを用いた光ファイバ増幅器ならびにこれらに応用した光伝送技術の研究が、国内外の研究機関で活発に進められている。これまで光の直接増幅技術としては、半導体レーザー(LD)増幅器<sup>1)</sup>および光ファイバ内の誘導ラマン散乱や誘導ブリルアン散乱を応用した光増幅器などが研究されてきた。しかし、これらの増幅器は现阶段では特性的にいくつかの問題点が残されており、実用の段階には至っていない。

一方、最近注目を浴びている光ファイバ増幅器は、増幅媒体としてコア部にエルビウム(Er)を微量添加した石英系単一モード光ファイバを用いる進行波形の増幅器である。光ファイバ増幅器は、増幅効率が高いため半導体レーザーによって容易に励起可能であり高い利得が得られるほか、従来、半導体レーザー(LD)増幅器で問題となっている増幅特性の偏波依存性がなく、かつきわめて低雑音であるなど、光増幅器としての優れた特性が確認されている。

本解説では、最近急速な進歩を遂げている光ファイバ増幅器の現状について概説するとともに、その応用技術ならびに今後の光伝送技術の発展に及ぼす新たな可能性について述べる。

#### 2. 光ファイバ増幅器の研究経緯

光ファイバ増幅器の特性について述べる前に、その開発史について少し触れることとしたい。レーザー活性物質である希土類元素をガラスに添加することによって、

光増幅現象の確認とガラスレーザーが最初に実現されたのは1960年代初頭のことであった。1961年にSnitzerは、Nd添加光ファイバの作製に成功<sup>2)</sup>するとともに、1964年には、Nd添加光ファイバを用いて波長1.06 $\mu\text{m}$ における光増幅実験を初めて報告した<sup>3)</sup>。1965年に至り、Snitzerらは現在のEr添加光ファイバ増幅器の基礎となるYb-Erガラスレーザーのパルス発振に成功した<sup>4)</sup>。そして、1971年にSnitzerは、それまでの成果をまとめて光ファイバレーザーや光ファイバ増幅に関する先駆的な提案を行った<sup>5)</sup>。一方、希土類元素添加ガラスの製造技術については、1974年にコーニング社の液浸法に関する特許が<sup>6)</sup>、1979年にNTTの気相法<sup>7)</sup>に関する特許がそれぞれ出願された。

1983年、MacChesneyらは希土類元素添加石英系光ファイバの開発に成功し<sup>8)</sup>、これらの光ファイバを種々の材料物性の測定に供した。ついで、1985年サザンプトン大学のPooleらは、MCVD法を応用して低損失の希土類元素添加石英系光ファイバの作製に成功した<sup>9)</sup>。この成功は、その後の光ファイバレーザーおよび光ファイバ増幅器の飛躍的な研究進展の契機となった。

1987年に至り、MearsらによってEr添加石英系単一モード光ファイバによる最初の光増幅実験が報告された<sup>10)</sup>。その後、Er添加石英系光ファイバの優れた増幅特性は、多くの研究機関で確認されるとともに、光ファイバ増幅器を使った長距離大容量光伝送実験でも実証されるに至った<sup>11)</sup>。

#### 3. 光ファイバ増幅器の原理と特徴

図1に、光ファイバ増幅器の基本的な構成を示す。光

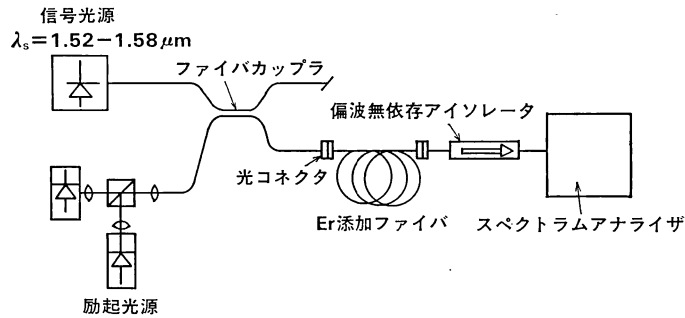


図 1 光ファイバ増幅器の基本構成

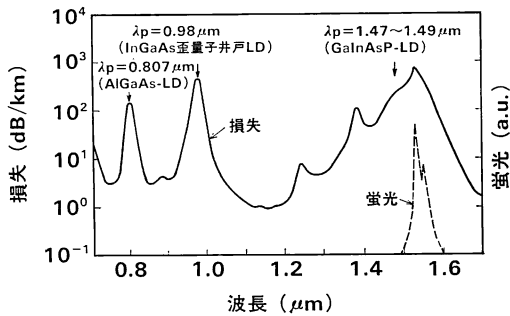


図 2 Er 添加光ファイバの損失波長特性と励起波長帯  
 図中の ↓印は、Er<sup>3+</sup> イオンの励起波長帯を、  
 点線は蛍光特性を示す。

ファイバ増幅器は、希土類元素を励起する励起光源、励起光と入力信号光とを合波する光合波器、増幅媒体となる Er 添加光ファイバおよび発振防止用の光アイソレータなどで構成される。光ファイバ増幅器の開発当初は、励起光源として Ar イオンレーザーや色素レーザーなどの大型のレーザーが用いられてきたが、最近では Er 添加光ファイバの増幅効率向上とともに InGaAsP レーザー (波長 1.48 μm) や InGaAs 歪量子井戸レーザー (波長 0.98 μm) などの半導体レーザーによる励起が可能となっている。光合波回路には、誘電体多層膜フィルタを適用したバルク形光合波回路または、融着延伸形の光ファイバカップラが用いられる。増幅媒体となる光ファイバは、従来の石英系光ファイバのコア部に微量の Er を添加したものである。その作製法については、後述する。光アイソレータは、増幅器の発振防止に必須の部品であり、光ファイバ増幅器の特徴を生かすため偏波無依存形のものが用いられる。

図 2 は、Er を添加した単一モード光ファイバの損失波長特性の一例を示す。この光ファイバのコア部の Er 添加量 (化学分析値) は 77 ppm である。図 2 に示されるように、Er<sup>3+</sup> イオンの吸収帯は、0.51 μm, 0.66 μm

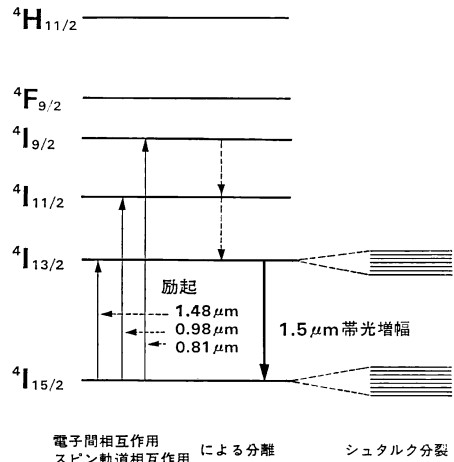


図 3 Er<sup>3+</sup> イオンのエネルギー準位

0.81 μm, 0.98 μm および 1.48 μm 等に存在する。これらの吸収帯は、それぞれ図 3 に示した Er イオンの各エネルギー準位に相当する。上記の励起波長帯のうち、実用的には半導体レーザーによる励起が可能な 0.81 μm, 0.98 μm および 1.48 μm 帯が重要である。

このような Er 添加光ファイバを増幅媒体とする光ファイバ増幅器の特長としては、以下の諸点があげられる。

- (1) 増幅効率が高く、LD 励起により 30 dB 以上の利得が得られる。
- (2) きわめて低雑音である (雑音指数: 5 dB 以下)。
- (3) コアの非円率が小さいため利得の偏波依存性がない。
- (4) 時間応答が速く、数ピコ秒以下の応答速度を有する。
- (5) 飽和出力が大きく、最大 10 dBm 以上が得られる。
- (6) Er イオンの蛍光寿命が約 14 ms と長いため、

高速光パルス列の増幅の際にパルスパターン効果を生じない。

- (7) 本質的に光ファイバのみで構成できるため、光伝送系と低損失で接続できる。
- (8) 増幅波長帯 (1.52~1.56  $\mu\text{m}$ ) が石英系光ファイバの極低損失波長帯に一致する。

一方、光ファイバ増幅器の短所としては、やや帯域幅が狭い点が挙げられるが、これはホスト材料にも大きく依存する特性であり、今後改良が進むものと考えられる。

#### 4. 希土類元素添加ガラスの作製法

希土類元素を石英ガラスに添加する手法としては、プラズマ法、MCVD法、液浸法、気相法(VAD法)などがある。以下に、これらの製造技術の概要について述べる。

##### 4.1 プラズマ法

歴史的には、プラズマ法が最も早く開発された。1982年に Namikawa らは、プラズマ炎を使ってネオジム(Nd)添加石英ガラスロッドの作製に成功するとともに、石英ガラス中へ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  や  $\text{P}_2\text{O}_5$  を共添加することによって、希土類元素のクラスタ発生を大幅に抑制できることを見いだした<sup>12)</sup>。

##### 4.2 MCVD法

MCVD法では、図4に示すように通常のMCVD光ファイバ母材合成装置に、希土類元素の原料を揮発させるための固定バーナを付加した装置を使用する<sup>9)</sup>。原料の希土類元素の塩化物(たとえば  $\text{NdCl}_3$ ,  $\text{ErCl}_3$ )は、出発石英管の上流部に設けられたチャンバ内で固定バーナの加熱によって気化し、キャリアガスとともに出発石英管の下流部へ送り込まれる。下流部では、ガラス合成用バーナにより、石英管内壁面に石英ガラス層が堆積され、これと同時にガラス内に希土類元素が添加される。MCVD法の特徴は、希土類元素と  $\text{GeO}_2$  や  $\text{Al}_2\text{O}_3$  などの副ドーパントとの共添加が比較的容易なこと、屈折

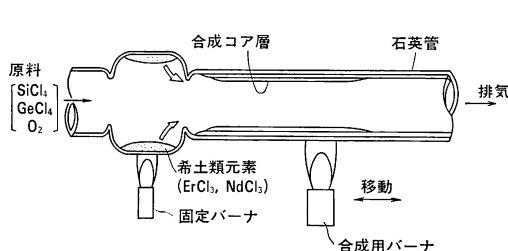


図4 MCVD法による希土類元素添加ガラス合成法<sup>9)</sup>

率分布制御性に優れることなどが挙げられる。現時点においてMCVD法の難点は、母材長手方向での均一性にやや劣る点であろう。

##### 4.3 液浸法

液浸法では、石英ガラスの多孔質体を合成する工程、これを希土類元素水和物(たとえば、 $\text{ErCl}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )のアルコール溶液に浸して希土類元素を含浸する工程、およびこれを乾燥し透明ガラス化する工程の3段階を経てガラスが合成される<sup>6)</sup>。多孔質体の作製には、OVD法、MCVD法およびVAD法等が用いられる。MCVD法を適用する場合には、石英管内壁面に堆積された  $\text{SiO}_2$  多孔質体に希土類元素を含浸後、中実化工程を経て直接光ファイバ母材が作製される。他の作製法の場合には、液浸法によって得られた希土類元素添加ガラスをコア母材として、この周囲にクラッドガラスが合成され光ファイバ母材が作製される。液浸法の特徴は、希土類元素を比較的高濃度に添加できる点にあり、これまでに4000 ppmを越える高濃度添加の例が報告されている<sup>13)</sup>。

##### 4.4 気相法(VAD法)

気相法は、図5に示すように、VAD法で作製した多孔質体を希土類元素の揮発ガス雰囲気内で加熱・透明化処理し、希土類元素添加ガラス母材を合成する方法である。本方法において希土類元素の添加濃度は、原料の加熱温度や多孔質体の透明化時間等によって制御される。気相法の特徴は、添加濃度の均質な母材が得られることおよび比較的低濃度の添加に有利な点である。清水らは、気相法によりクラスタ発生がきわめて少なく増幅効率の高いEr添加光ファイバを実現している<sup>14)</sup>。

#### 5. 光ファイバ増幅器の特性

前章で述べたように、光ファイバ増幅器は従来の光増幅器に比較して多くの優れた特徴がある。ここでは、利得や雑音など光ファイバ増幅器の主要な特性について、筆者らの実験結果を交えて概説する。

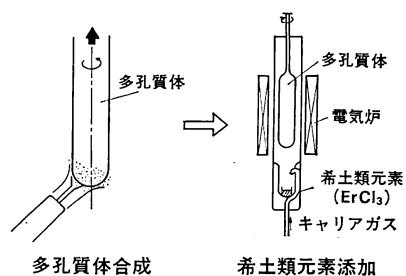


図5 気相法による希土類元素添加ガラス合成法<sup>14)</sup>

### 5.1 増幅特性

図 6 は、Er 添加濃度 77 ppm、長さ 100 m の光ファイバを波長 1.48  $\mu\text{m}$  の半導体レーザーによって励起したときの amplified spontaneous emission (ASE) の分光特性を示す<sup>11)</sup>。波長 1.536  $\mu\text{m}$  および 1.552  $\mu\text{m}$  近傍に蛍光のピークが観測されるが、この特性がほぼ光ファイバ増幅器の利得波長特性に対応する。

図 7 は、光ファイバ増幅器の増幅度波長依存性を示す<sup>15)</sup>。励起光源は、波長 0.98  $\mu\text{m}$  の半導体レーザー (歪量子井戸レーザー) である。図より、波長 1.536  $\mu\text{m}$  および 1.552  $\mu\text{m}$  に増幅度のピークが存在するのが確認できる。このピーク付近での増幅帯域幅は、それぞれ 2 nm および 4 nm 程度であり、LD 増幅器の約 50 nm と比較してかなり狭い。光ファイバ増幅器の増幅帯域特性は、ホスト材料にも大きく依存する。事実  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Er}$  系の石英ガラスにおいては、上記の  $\text{SiO}_2\text{-Er}$  系ガラスの場合と比較して帯域幅が広がる事が報告されている<sup>16)</sup>。

図 8 は、Er 添加光ファイバ増幅器における増幅度の励起光量依存性の一例を示す。励起光源は、波長 0.98  $\mu\text{m}$  の半導体レーザー<sup>15)</sup> (歪量子井戸レーザー) であり、入力信号光の波長は 1.536  $\mu\text{m}$  である。図 8 に示される

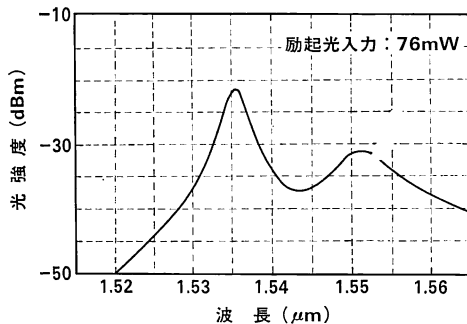


図 6 Er 添加光ファイバの ASE 波長依存性<sup>11)</sup>

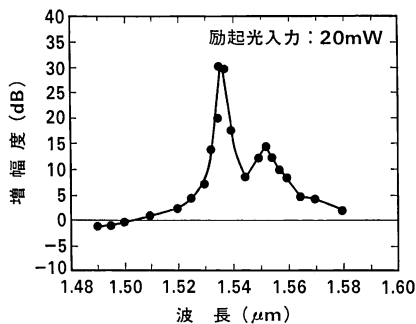


図 7 増幅度の波長依存性<sup>15)</sup>

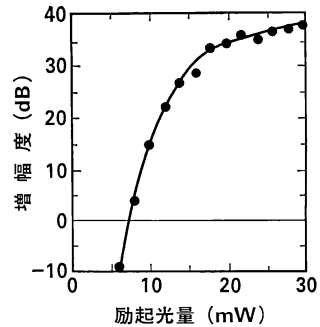


図 8 増幅度の励起光量依存性<sup>15)</sup>

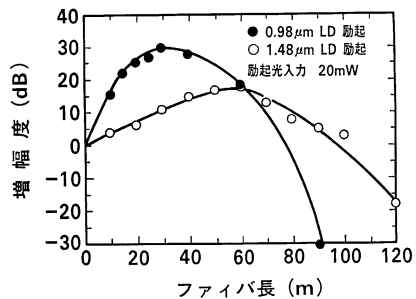


図 9 増幅度のファイバ長依存性<sup>15)</sup>

ように、十数 mW の小さな励起光入力によっても 30 dB 以上高い利得が実現されている。

図 9 は、励起光源の波長とファイバ長によって増幅度がどのように変化するかを示したものである<sup>15)</sup>。励起波長は、0.98  $\mu\text{m}$  および 1.48  $\mu\text{m}$  であり、光源としていずれも半導体レーザーを使用している。また、測定時の励起入力光量はいずれも 20 mW 一定である。図 9 の測定結果が示すように、0.98  $\mu\text{m}$  帯励起の光ファイバ増幅器は、1.48  $\mu\text{m}$  帯励起の場合と比較して同一の励起光量に対して増幅度が約 2 倍高いこと、また最大の増幅度を得るために必要な光ファイバ長は約半分でよいことがわかる。これは、Er イオンによる吸収損失係数が各励起波長帯によって異なること、および増幅波長帯 (1.53~1.56  $\mu\text{m}$ ) においても Er イオンの強い吸収損失があるため生じる結果であり、3 準位系の増幅機構の特徴を示すものと言える。

図 10 は、1.48  $\mu\text{m}$  LD 励起の光ファイバ増幅器について、波長 1.536  $\mu\text{m}$  における増幅度の Er 添加濃度依存性を調べたものである<sup>14)</sup>。光ファイバのコア材料およびクラッド材料は、それぞれ  $\text{SiO}_2\text{-Er}$  および  $\text{SiO}_2\text{-F}$  である。Er 添加光ファイバの励起光量は、波長 1.48  $\mu\text{m}$  において 40 mW 一定である。また、Er 添加光ファイバの長さは、おおよその Er 添加濃度に対し最大の増幅

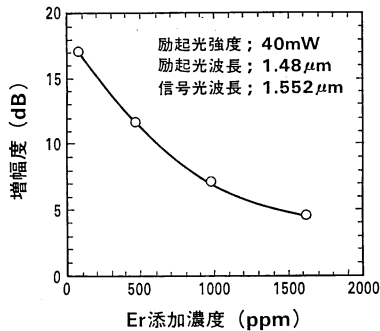


図 10 増幅度の Er 添加濃度依存性<sup>14)</sup>

度が得られるよう調整されている。図 10 の結果は、Er 添加濃度の増加に伴い、増幅度が著しく低下することを明瞭に示すとともに、添加濃度が 1000 ppm 以下であっても石英ガラス中に Er クラスタ (または、Er-Er 結合) が発生し、増幅特性に重大な影響を及ぼすことを示している。このような増幅効率低下の原因については、Ainslie らによって Er クラスタの存在に基づく cooperative upconversion process (以下 CUP と略す) に起因するものであるとの指摘がなされている<sup>17)</sup>。

以上のように、Er 添加光ファイバを用いた光増幅器の特性は、Er に固有の光学的特性に依存するところがきわめて大きい。しかし、光ファイバ増幅器は、増幅媒体の導波構造を工夫することによっても、増幅効率を改善することができる。具体的には、Er 添加光ファイバの開口径 (NA) を大きくする方法や Er をコアの中心部

に集中して添加する方法などが検討されている<sup>18)</sup>。

### 5.2 雑音特性

光ファイバ増幅器の雑音成分は、LD 増幅器の場合と同様にショット雑音とビート雑音に大別されるが、雑音の主要成分はビート雑音である<sup>19)</sup>。ショット雑音には、入力信号光自身に起因する信号光ショット雑音と光ファイバ増幅器の光増幅過程で発生する自然放出光ショット雑音がある。一方、ビート雑音には、自然放出光相互の間で発生するビート雑音 (自然放出光間ビート雑音) と信号光と自然放出光の間で発生するビート雑音 (信号光・自然放出光間ビート雑音) がある。これらの雑音成分のうち、自然放出光間ビート雑音は、狭帯域フィルタ等の使用により除去可能な成分であるため、信号光・自然放出光間ビート雑音が、光ファイバ増幅器の本質的な雑音と言える。

図 11 に、0.98  $\mu\text{m}$  および 1.48  $\mu\text{m}$  帯 LD 励起光ファイバ増幅器の信号光出力に対する雑音特性を示す<sup>19)</sup>。図に示した信号光・自然放出光間ビート雑音の測定値から、0.98  $\mu\text{m}$  帯 LD 励起および 1.48  $\mu\text{m}$  帯 LD 励起光ファイバ増幅器の本質的な雑音指数はそれぞれ 3.2 dB および 4.1 dB と見積られている<sup>14)</sup>。これらの測定値は、理論的に予測<sup>20)</sup>されていた値によく一致することが確認されている。

## 6. 応用技術

これまで述べてきたように、光ファイバ増幅器は多く

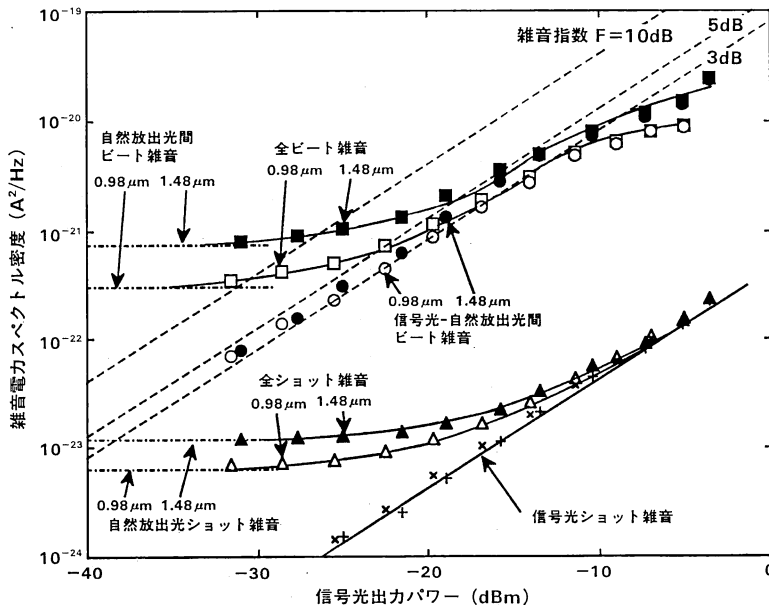


図 11 光ファイバ増幅器の雑音特性<sup>19)</sup>

の優れた特長を有することから、各種光伝送システムへの適用をはじめとしてきわめて広範囲な応用が期待されている。とくに、光伝送系へ適用した場合、高利得、低雑音、高速応答で代表される光ファイバ増幅器の優れた特徴は、光伝送技術の飛躍的な進展を促す可能性を秘めていると言えよう。具体的には、パワーアンプやプリアンプとして用いることにより中継器利得を大幅に拡大できる点および伝送損失や分岐損失を補償できる点である。適用可能な伝送方式には、長距離大容量光伝送方式、加入者系光伝送方式、映像信号伝送方式 (CATV)<sup>21)</sup>、コヒーレント光伝送方式など広範囲に及ぶ。たとえば、無中継の光伝送方式では、中継器利得を既存のシステムに比較して 20 dB 以上拡大できるため、最大中継間隔を 100 km 程度延長できると考えられている<sup>11)</sup>。超大容量光伝送については、すでに 10 Gbit/s の伝送実験が報告されている<sup>22)</sup>。また、将来の高度な光通信技術として、ソリトン伝送への適用も検討されている<sup>23)</sup>。

これまで、増幅媒体として Er 添加石英系ファイバを用いた光ファイバ増幅器について述べてきたが、将来技術として、いっそうの小型化、高機能化をねらいとした導波路形光増幅器の研究も進められている<sup>24)</sup>。これらの増幅媒体の候補としては、石英系光導波路<sup>25)</sup>や LiNbO<sub>3</sub> 光導波路<sup>26)</sup>などがあり、この分野の今後の研究進展に期待したい。

## 7. ま と め

最近急速な進歩を示している光ファイバ増幅器の現状技術について述べるとともに、今後の技術動向について概説した。光ファイバ増幅器が、1960 年代においてその基本原理が確認されて以来、長い空白期間において、ここ数年で飛躍的な進展をみた背景には、希土類元素添加光ファイバ作製技術の開発はもとより、励起用半導体レーザー、光ファイバカップラ、光アイソレータなど周辺技術の著しい進歩に依るところがきわめて大きい。今後の技術課題としては、実用性の高い (小型、低消費電力、高効率) 光ファイバ増幅器の実現とともに、1.3 μm 帯光増幅器用ガラスの開発など新材料の開拓が重要となる。Er 添加光ファイバを用いた光増幅技術とその応用技術は、これら周辺技術の進歩と相まって今後いっそう発展することが期待される。

日頃ご指導いただき、池上光エレクトロニクス研究所長、内田光複合部品研究部長、車田集積光エレクトロニクス研究部長、杉田主幹研究員、上原主幹研究員に感謝いたします。また、光ファイバ増幅器に関して有益な討

論をしていただいた、清水研究主任、山田研究主任に感謝いたします。

## 文 献

- 1) T. Mukai, Y. Yamamoto and T. Kimura: "S/N and error rate performance in GaAs semiconductor laser preamplifier and linear repeater systems," IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 1560-1568.
- 2) E. Snitzer: Phys. Rev. Lett., **7** (1961) 444-446.
- 3) C. J. Koester and E. Snitzer: "Amplification in a fiber laser," Appl. Opt., **3**, 10 (1964) 1182-1186.
- 4) E. Snitzer and R. Woodcock: "Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup> glass laser," Appl. Phys. Lett., **6** (1965) 45-46.
- 5) E. Snitzer: "Lasers and glass technology," Ceram. Bull., **52** (1971) 516-525.
- 6) 特開昭 50-73908.
- 7) 特許第 1171723 号, 特許第 1450629 号.
- 8) J. Hegarty, M. N. Broer, B. Golding, J. R. Simpson and J. B. MacChesney: "Photon echoes 1K in a Nd<sup>3+</sup>-doped glass fiber," Phys. Rev. Lett., **51** (1983) 2033.
- 9) S. B. Poole, D. N. Payne and M. E. Fermann: "Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions," Electron. Lett., **21** (1985) 737-738.
- 10) R. J. Mears, L. Leekie, I. M. Jauncey and D. N. Payne: "High gain rare-earth doped fiber amplifier operating at 1.55 μm," Proc. ECOC '87, W12, Reno, Nevada, USA, 1987.
- 11) 萩本和男, 高田 篤, 相田一夫, 中川清司: "ファイバ増幅器を用いた長スパンギガビット/秒光伝送システムの検討", 電子情報通信学会研究会資料, OCS 89-3 (1989).
- 12) H. Namikawa, Y. Ishii, K. Kumata, K. Arai and T. Tsuchiya: "Preparation of Nd-doped SiO<sub>2</sub> glasses by axial injection plasma torch CVD and their fluorescence properties," Jpn. J. Appl. Phys., **23** (1984) L 409-L 411.
- 13) J. E. Townsend, S. B. Poole and D. N. Payne: "Solution-doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibers," Electron. Lett., **23** (1987) 329-331.
- 14) M. Shimizu, M. Yamada, M. Horiguchi and E. Sugita: "Concentration effect on optical amplification characteristics of Er-doped silica single-mode fibers," IEEE Photon. Tech. Lett., **2**, No. 1 (1990) 43-45; 清水 誠, ほか: 平成 2 年度信学全大講演予稿集, 分冊 4, SC-3-4 (1990) pp. 509-510.
- 15) S. Uehara, M. Horiguchi, T. Takeshita, M. Okayasu, M. Yamada, M. Shimizu, O. Kogure and K. Oe: "0.98 μm InGaAs strained quantum well lasers for erbium-doped fiber optical amplifier," Proc. IOOC '89, 20 PDB-11, Kobe, Japan (1989).
- 16) C. G. Atkins, J. F. Massicott, J. R. Armitage, R. Wyatt, B. J. Ainslie and S. P. Craig-Ryan: "High-gain, broad spectral bandwidth erbium-doped fibre amplifier pumped near 1.5 μm," Electron. Lett., **25** (1989) 910-911.
- 17) B. J. Ainslie, S. P. Craig-Ryan, S. T. Davey, J. R. Armitage, C. G. Atkins and R. Wyatt: "Optical analysis of erbium doped fibres for efficient lasers and amplifiers," Proc. IOOC '89, 20A3-2, Kobe (1989) pp. 22-23.
- 18) B. J. Ainslie, J. R. Armitage, S. P. Craig and B. Wakefield: "Fabrication and optimization of the

- erbium distribution in silica based doped fibres," Proc. ECOC '88, Brighton, U.K. (1988) pp. 62-65.
- 19) M. Yamada, M. Shimizu, M. Okayasu, T. Takeshita, M. Horiguchi, Y. Tachikawa and E. Sugita: "Noise characteristics of Er<sup>3+</sup>-doped fiber amplifiers pumped by 0.98 and 1.48  $\mu$ m laser diodes," IEEE Photon. Tech. Lett., **2**, No. 3 (1990) 205-207; 山田 誠, ほか: 平成2年度信学全大講演予稿集, 分冊 4, SC-3-7 (1990) pp. 515-516.
  - 20) R. Olshansky: "Noise figure for erbium-doped optical fiber amplifiers," Electron. Lett., **24** (1988) 1363-1365.
  - 21) 米田悦吾: "光加入者映像伝送システムの現状と展望", 電子情報通信学会光通信システムシンポジウム予稿集, OCS 89-1s (1989).
  - 22) K. Hagimoto, Y. Miyagawa, Y. Miyamoto, M. Ohhashi, M. Ohhata, K. Aida and K. Nakagawa: "A 10 Gb/s long-span fiber transmission experiment employing optical amplification technique and monolithic IC technology," Proc. IOOC '89, 20 PDA-6 (1989).
  - 23) K. Iwatsuki, S. Nishi, M. Saruwatari and M. Shimizu: "2.8 Gb/s error-free optical soliton transmission employing all laser diodes," Proc. IOOC '89, 20 PDA-1, Kobe (1989).
  - 24) 島田禎晋: "Er ドープファイバ増幅器が光通信システムに与えるインパクト", O plus E, No. 113 (1989) 75-82.
  - 25) 北川 毅, 服部那典, 日比野善典, 大森保治: "Nd 添加石英系導波型レーザ", 平成2年度応用物理学学会講演 (1990)
  - 26) E. Lallier, J.P. Pocholle and M. Papuchon: "Laser oscillation of a single mode channel waveguide in Nd: Mg: LiNbO<sub>3</sub>," Proc. IOOC '89, 20 PDB-1 (1989).