

講 義

光ファイバとその応用—XII

研究の立場から見た光ファイバの将来

大 越 孝 敬

東京大学先端科学技術研究センター 〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1

(1990年8月15日受理)

Optical Fiber and Its Applications—XII

Future Prospect from Researcher's Viewpoint

Takanori OKOSHI

Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST)
University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153

1. ま え が き

今回は藤倉電線株式会社の山内良三・稻田浩一両氏が「製造側から見たファイバの将来」と題して、この分野の将来を展望された。それを受けて本講義最終回の今回は、「研究面から見た」将来展望を、大学に籍をおく研究者の立場で書かさせていただくことになっている。

本論に入る前に、まず光ファイバ技術とその通信等への応用技術の現在の動向について、筆者なりの見方で概観してみたい。箇条書きにすると以下の諸点が挙げられよう。

- (1) 通常用途の単一モード石英ファイバの技術がほぼ完成に近い状態に達し、応用範囲と生産量が急拡大しつつある。
- (2) それに伴って、多モード石英ファイバや、近距離用の安価な光ファイバとして期待された多成分ガラスファイバ、ポリマークラッド石英ファイバ、オールプラスチックファイバ等の分担範囲が、10年前に予想されたよりも狭められた感がある（ただしオールプラスチックファイバには、装飾・工芸など通信とは別種の用途が拡大しつつある）。
- (3) 反対に、単一モード石英ファイバの性能をいわずに極限まで高めるための分散シフトファイバ (dispersion-shifted fiber: DSF)、分散平坦化ファイバ (dispersion-flattened fiber: DFF)、偏波保持ファイバ等の技術は一応の水準に達したものの、価格や性

能の再現性まで考えるとまだ未完成の状態にあり、研究の余地が大きい。

- (4) 通常の「線形かつ受動的な」ファイバの研究開発の一段落に伴い、誘導ラマン散乱、誘導ブリルアン散乱、光カー効果、光ソリトン効果、光パルス圧縮、四光子混合などの光ファイバ中の非線形現象、およびエルビウムドープ光ファイバ増幅器 (erbium-doped fiber amplifier: EDFA) に代表される能動光ファイバの研究が盛んになってきた。とくに EDFA の登場は、光通信技術の全体系に巨大なインパクトを与えつつある。
- (5) これまで、ファイバ形光カップラのような光ファイバをベースとする光回路素子は、その大きすぎる寸法から見ても、いつの日か小型化にすぐれたプレーナ構造の光集積回路にその地位を明け渡すべきもの、と考えられてきた。しかし実際は、光素子と光素子を結合する手段として、ファイバ同士の永久接続 (スプライシング) およびコネクタ接続がむしろ次第に標準的な方法になりつつある（たとえば半導体レーザーでも製造の時点でピグテールを装着してしまうものが増えている）。これはファイバ間接続が他の方法にくらべて圧倒的に安定かつ低損失であるからに他ならない。

この傾向を近い将来に向かって外挿すると、光カップラだけでなく光変調器、光アイソレータ、ポラライザ (偏光子)、1/4 波長板、1/2 波長板、光フィ

ルタなど、種々の光回路素子をファイバ主導形で作り、ひいては全回路をオールファイバ化する技術体系が生み出される可能性がある。(ただし、これは恐らく中期的な傾向で、最終的(たとえば20年後)には集積回路型の技術に席を明け渡す可能性も大きい。)

さて、上記の動向にもとづいて「研究の立場から見た光ファイバの将来」を論じるのが、本稿の任務である。しかし、これまでの11回の連載を読んで、上記の諸問題の中には、現状から将来問題までが既に詳細に論じられているものが多いことに、気付かざるを得なかった。そこでここでは、比較的論じられなかった光ファイバ増幅器、とくにEDFA(前出)と、それが近い将来に光通信システムにもたらすであろう変化、さらにそれがDSFおよびDFP(前出)技術に及ぼす変化、の3点について、重点的に考察することにする。

2. 光ファイバ増幅器はいかにして登場してきたか

2.1 技術的背景

電波通信の世界では、1930年代に大きな変化がおこった。それまでの直接検波型受信機に代わってヘテロダイン型受信機が一般化し、いわばコヒーレント通信の時代がはじまった。これに対して光通信の分野では、コヒーレント光ファイバ通信の登場により、同様の変化がほぼ60年遅れて1990年代に起ころうとしている。換言すれば、これからの光ファイバ通信は、ヘテロダイン受信、受信機内での遅延補償、周波数多重化など、次第に今日

の電波通信に似た姿を持つようになると思われる¹⁾。

しかし光通信にはひとつ欠けているものがあった。それは光通信には搬送波(光波)を増幅する実用的な手段がないことであった。これまで最有力の候補は半導体レーザー増幅器であって、その研究開発には既に10年以上の歴史があるが、まだ実用段階になったとは言えない。実用への最大の障害は、「ファイバとプレーナ光デバイス効率よく結合することの難しさ」にある。その結合損失は高度の技術をもってしても3dBとすることは難しい。

これに対して、エルビウム光ファイバ増幅器(EDFA)は、研究の活発化からわずか1~2年で、「最も有望な光波増幅器」の地位を確立してしまった。その最大の利点のひとつは、EDFAと通常の光ファイバが容易に、かつ低損失で接続できることである。EDFAの登場により、後述のように電波通信と光ファイバ通信は将来きわめて良く似た姿をとるようになると思われる。

エルビウムは希土類元素のひとつである。これを石英ガラスに混入したときレーザー物質としてきわめて有用である理由は、図1に示すように、エルビウムが石英ガラスの最小損失波長1.55 μm とほぼ一致した遷移ギャップをもつことにある。しかも周辺のエネルギー準位の緩和時間の関係からも、図1(a)に示すように514nm、650nm、800nm、980nm等、比較的光源を得やすい波長でのポンピングが可能である²⁾。ポンプ波長にはさらに図1(b)に示す1.49 μm があり、また同図に見られるように増幅波長は正確には1.535 μm と1.55 μm である。

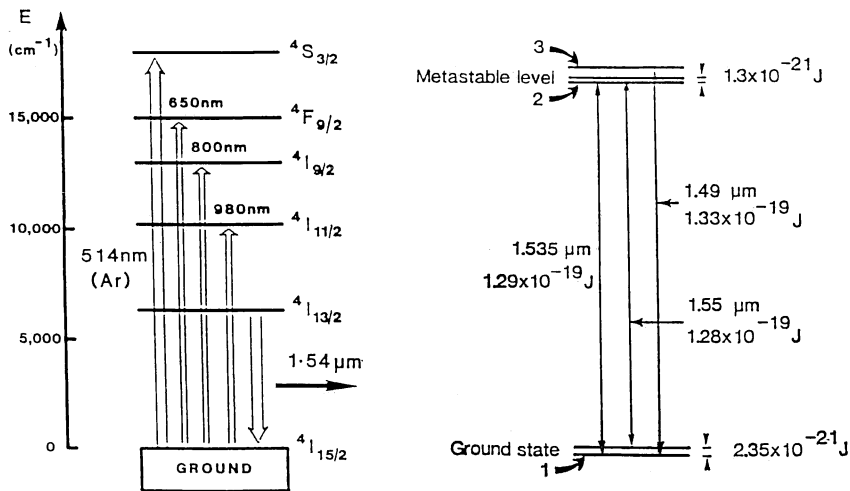


図1 エルビウムのエネルギー順位図²⁾
(a)全体図, (b)1.54 μm の放射に寄与する微細構造

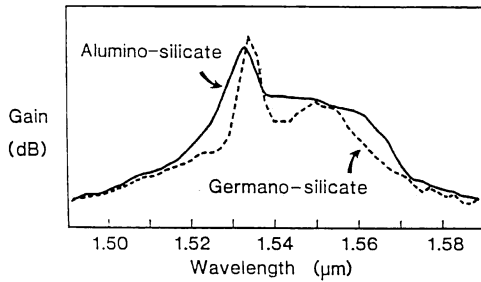


図2 エルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) の典型的な利得対周波数特性²⁾

その結果、図2に示すように典型的な増幅特性はほぼ1.52 μm から1.57 μm に及ぶ、やや平坦でない帯域を持つことになる。この帯域値は、二つの増幅波長の存在によって広がっているとも言える。一方で半導体レーザー増幅器と比較すれば、波長選択の自由度がほとんどない点は大きな欠点になっている。

2.2 歴史的背景

希土類元素をドープした光ファイバで光増幅器を作る研究は、すでに30年近い歴史を持っている。ネオジウムドープ光ファイバの作成の最初の成功は1962年であり、1964年にはそれを用いた1.06 μm の増幅に成功している³⁾。しかしエルビウムを用いるEDFAの最初の成功は、その23年後の1987年である⁴⁾。その後EDFAの研究開発は、その圧倒的な技術的利点、すなわち

- (1) 1.5 μm 帯における増幅 (前述)
- (2) 光ファイバとの接続の容易さ (前述)
- (3) 高い増幅利得 (20~30 dB)
- (4) 比較的低い雑音指数 (3.2~4.5 dB, ただし中入力パワーに対して)
- (5) 増幅特性の偏波無依存性

のためにわずか3年間の間に急速に拡大し、今日に至っている。

3. 光ファイバ増幅器は光ファイバ通信のシステムをどのように変えようとしているか

3.1 光ファイバ増幅器の用途

将来の光ファイバ通信における光ファイバ増幅器の用途として挙げられるものは、以下の四つである。

- (1) 送信機の出力増強用のブースター増幅器
- (2) 光CATV網等における(信号分岐のための)ブースター増幅器
- (3) 中継 (In-line) 増幅器

(4) 受信機用前置増幅器

これらの諸用途に対するEDFAの適性については、この一兩年、多くの論文で論じられて来たが、筆者は以下の理由で、これらのすべてにかなりの将来性があり、またその中でも(2)、(3)はとくに有望と考えている。

まず送信用ブースター増幅器から順番に考えてみる。いまの光ファイバ通信では、典型的な送信光パワーは3 mW以下、たかだか10 mW以下である。これは送信用レーザーの出力限界のためではなく、石英光ファイバでは数 mW以上の入力ではブリルアン散乱(周波数変換型の後方散乱)が発生するからである。したがってブースターを使いたくなるのは、特別に損失の大きい外部変調器が送信用レーザーの後に挿入された場合など、やや特殊な場合に限られることになろう。ただし今後、超高速(10 Gb/s以上)の変調が、挿入損失がやや大きい外部変調器を用いる形で一般化し、かつEDFAが安価になると、この形の応用は拡大すると思われる。

第2の信号分岐のためのブースター増幅器は、これからの発展が期待できる有望な応用のひとつであろう。先進諸国では今後25~30年間にいわゆるFiber-to-the-Home (FTTH) またはFiber-to-the-Curb (FTTC) の名のもとに、各家庭にまで光ファイバ網が張りめぐらされることになると考えられている。その際のネットワーク構成のひとつの形が「トリー型」であるが、その場合たとえば100分岐に対しては事前に20 dB以上の、また1000分岐に対しては30 dB以上の分岐損失補償用ブースター増幅器が必要である。そのために、飽和出力レベルと増幅利得の大きいEDFAの開発が、強く望まれることになるであろう。

中継増幅器も有望な応用のひとつであるが、次節に改めてまとめて論じることとする。

最後の受信機用前置増幅器については、今日の議論にしばしば混乱が見られるように思う⁵⁾。たとえば「雑音指数(noise figure: NF)が3.2 dBのEDFAを完成した」等の報告がしばしば見られるが、このような低いNFは中パワーレベルにおいてのみ得られるものであることに、注意する必要がある。低パワーレベルでは、NFは信号レベルに反比例して上昇するので、光受信機の入力端子のように、信号1ビット当りの光子数が100~1000の入力レベルでは、容易にNFは20~30 dBという高い値になってしまう。これを防ぐ方法は、下記のように二つ考えられる(ただし目下のところいずれもやや困難が大きい)。

- (1) 波長帯域が1 nmよりずっと小さい(できれば

0.1nm 以下の) 光フィルタを前置増幅器の後に挿入し、低信号レベルでの NF 上昇の原因である「自然放出光間ビート雑音」のもとである「自然放出光」の総量を減らす。しかしこのような光フィルタはまだ実用技術に達していない。

- (2) 前置 EDFA に続けて、ヘテロダイン (またはホモダイン) 受信機を用い、自然放出光間ビート雑音の効果を現れにくくする。しかし、ヘテロダイン受信機を用いるのであれば、前置増幅器を用いなくても EDFA 以下の NF を実現できるので、この解決法は実際上の意味が少ないと考えられる。(すなわち、はじめからヘテロダイン受信機を用いれば良いことになる。)

次節においては、上記で論じ残した中継増幅器を用いるシステムについて考察しよう。

4. EDFA 中継器を用いる長距離光通信システム

EDFA 中継器を多数使用すると、1,000 km から 10,000 km におよぶ長距離光通信システムを実現できる可能性がある。これについては 12 台の EDFA を用いた 904 km の伝送実験 (KDD)⁶⁾、25 台の EDFA を用いた 2200 km の伝送実験 (NTT)⁷⁾ などが既に報告されている。前者では最終段に直接検波型受信機が、後者ではヘテロダイン受信機が使用された。前者の実験システムの構成を図 3 に示す。

このような技術の動向を外挿すると、近い将来における長距離光ファイバ通信システムは、図 4 に示すような 4 種の基本型に分類されるようになると思われる。すなわち

- 中継増幅器 (光中継器) なしで受信端で直接検波受信するもの
 - 中継増幅器なしで受信端でコヒーレント受信するもの
 - 中継増幅器を経て、直接検波受信するもの
 - 中継増幅器を経て、コヒーレント受信するもの
- ただし、途中に再生中継器 (いったん電気信号に変換される型の中継器) を用いる場合について考察するに当たっては、図 4 はその 1 区間のみを描いたもの、と理解していただきたい。

さて、このようなシステムに用いられる EDFA が満たすべき最大の要件は何であろうか。言うまでもなく低雑音性である。そして EDFA を低雑音領域で動作させるためには、各 EDFA の入力光信号レベルをあまり低

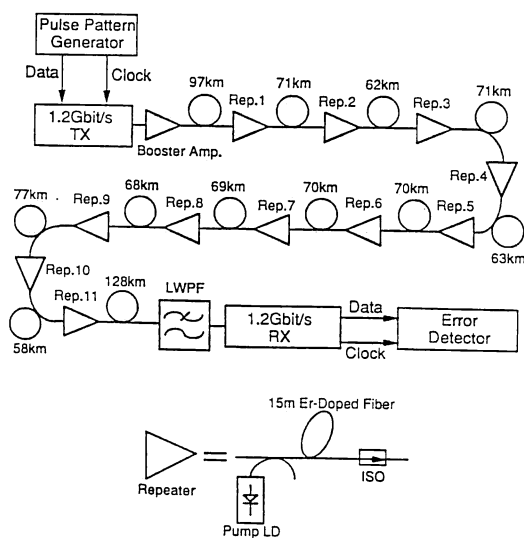


図 3 12 台の EDFA を用いた伝送速度 1.2 Gbit/s、伝送距離 904 km の実験システム⁶⁾

くしてはならない⁵⁾。具体的に言うと、通常の光受信機の受信レベルのたとえば 100 倍くらいのところまで光信号が減衰したら、次の EDFA が来るようにしておく必要がある。換言すれば、すべての EDFA を中パワーレベルで動作させる必要がある。そのようにすれば、理論的に各段の EDFA の雑音指数 (NF) を 2 (=3 dB) 近くまで下げることが可能であり、事実、実験的にも最良値では約 2.1 (=3.2 dB) の値が得られている。

この程度の NF が得られれば、たとえば EDFA を 150 台用いて 10,000 km を伝送することは、理論上は十分可能である。ただしその際、全ルート総合 NF (初段の EDFA の入力端で定義された NF) は、たとえば 150 台の場合、ほぼ $2.1 \times 150 = 315 \approx 25$ dB となることが理論的にわかっている。すなわちこの場合、送信機から受信機までの「能動的線路」は、「多くの雑音を発生する (noisy な) 長距離伝送メディアである」と言える。

このような状態は、図 5 に示すように従来の電波通信の媒体 (自由伝搬空間) と非常に良く似たものであって、したがってこのような光通信システムの研究開発に当たっては、多くの教訓を 60 年前の電波通信の前例から引き出すことができる。

まず EDFA が発生する広帯域雑音 (自然放出光雑音) の悪影響を抑えるために、よい光学的フィルタが必要である。さらにそれを受信機内で最小限に抑えるために、ヘテロダイン方式を採用することが有効である。ヘテロダイン方式 (またはそれと等価な二段階位相ダイバーシティ方式受信機⁸⁾) を用いることは、長大化した(た

例えば 10,000 km) 光ファイバ線路がもたらす大きな群分散を、中間周波増幅器内で補償することをも可能にする。

このことは、超長距離光ファイバ伝送路のための分散

シフトファイバ(DSF)または分散平坦化ファイバ(DFP)の研究開発の緊急性の大きさに、微妙に影響を与えよう。すなわち、もし将来このようなシステムの最終段受信機に直接検波型が用いられるのであれば、DSF

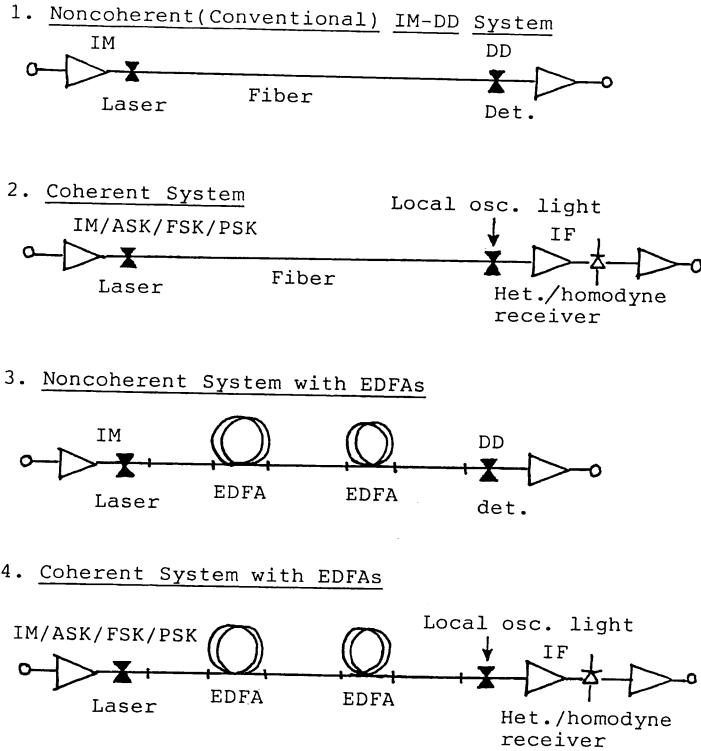


図 4 光ファイバ通信システムの4種類の基本型

1. 非コヒーレント型強度変調・直接検波方式 (現行方式), 2. コヒーレント方式 (ヘテロダインまたはホモダイン検波), 3. 光ファイバ増幅器を挿入した非コヒーレント方式, 4. 光ファイバ増幅器を挿入したコヒーレント方式

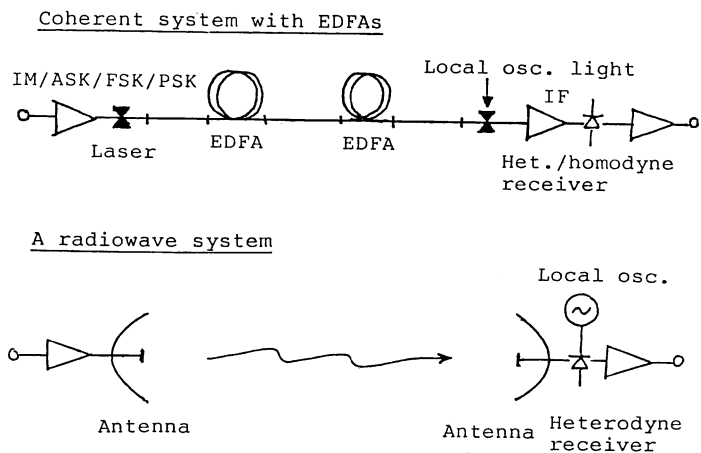


図 5 光ファイバ増幅器ならびにコヒーレント受信方式を併用する将来の長距離光ファイバ通信と、現在の電波通信システムの類似性を示す図

または DFF の研究開発は第一義的な緊急性を持っていると言える。反対にもし受信機をコヒーレント化して良ければ、光ファイバの分散特性はのちに受信機内で補償可能となるので、DSF/DFF の必要性はやや軽減されることになる。

5. 種々の光ファイバ回路素子の開発

第1節第(5)項において、光ファイバとの接続の容易さと接続損失の少なさの故に、ファイバ形の回路素子が予想に反して長い寿命を保っていることを述べた。この種の技術のほとんどは、本連載第8回において保立和夫氏によって詳論されたので、ここでは繰り返さないが、当分の間(10~20年間)、その重要性は薄れないだろうと言うのが筆者の予想である。

保立氏が挙げられなかった回路素子として、トロイダル型光ファラデー素子⁹⁾を用いるアイソレータ、多重マッハツェンダー干渉計型狭帯域(10~100GHz)フィルタ¹⁰⁾等を挙げておきたい。保立論文の表1中の諸技術にこれらを加えて考え、それらの技術を総動員すると、「送信レーザーから受信機の検波器まで、光が一度もファイバから外に出ない」形の光通信システムが可能である。このような構成は、装置の寸法がやや大きくなることを許せば、伝送損失・結合損失に着目する限り、現在実現し得る最も高性能のシステムとなる可能性がある。

さらに、新しい能動的ファイバ素子としては、エルビウムを低濃度(数ppm以下)で石英ファイバにドーピングし、伝送用光ファイバの全長にわたって増幅作用を付与する(あるいは「無損失化」する)「分布型 EDFA」の研究がある^{11,12)}。この研究は1990年に入ってから試作例が論文に現れはじめたもので、目下のところ実用上の利点はまだ明確ではないが、将来ソリトン伝送技術と結合して興味あるデバイスとなる可能性があると思う。

6. む す び

以上、これまでの11回の連載講義で欠けていた部分

を中心に、光ファイバおよび光ファイバ回路素子の将来動向を論じた。とくに本連載講義企画後に急浮上した EDFA についてやや詳しく論じ、それに関連して将来の興味ある研究課題について述べた。

文 献

- 1) T. Okoshi and K. Kikuchi: *Coherent Optical Fiber Communications* (KTK/Kluwer, 1988); 大越孝敬, 菊地和朗: コヒーレント光通信工学 (オーム社, 東京, 1989).
- 2) D. N. Payne and R. I. Laming: "Optical fiber amplifiers," Tutorial Paper No. TuF1, OFC '90, San Francisco, CA, USA (Jan. 1990).
- 3) C. J. Koester and E. Snitzer: "Amplification in a fiber laser," *Appl. Opt.*, **3** (1964) 1182-1186.
- 4) R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey and D. N. Payne: "High-gain rare-earth-doped fiber amplifier at 1.54 μm ," *Conf. Opt. Fiber Commun. (OFC '87)*, No. WI 2, Reno, Nevada (1987).
- 5) 大越孝敬: "光受信機および光増幅器における雑音指数の概念について一定義, 計算例および継続接続公式", 信学技会報, OCS 90-21 (1990).
- 6) N. Edagawa, *et al.*: "904 km, 1.2 Gbit/s non-regenerative optical transmission experiment using 12 Er-doped fiber amplifiers," *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC '89)*, No. PDA-8, Gothenburg, Sweden (1989).
- 7) S. Saito, *et al.*: "An over 2,200 km coherent transmission experiment at 2.5 Gbit/s using erbium-doped-fiber amplifiers," *Conf. Opt. Fiber Commun. (OFC '90)*, No. PD2, San Francisco, CA (1990).
- 8) T. Okoshi and S. Yamashtia: "Double-stage phase-diversity (DPSD) experiment using 100 Mbit/s FSK coherent optical communication system," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 1512-1513.
- 9) T. Okoshi, K. Kikuchi and Y. H. Cheng: "A new polarization control scheme for optical heterodyne receiver," *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC '85)*, Tech. Digest 405-408, Venice, Italy (1985).
- 10) 井上 恭, 鳥羽 弘, 野須 潔: "光波 FDM 伝送合波器の検討", 昭和60年信学会全大, No. 2646 (1985).
- 11) D. Tanaka, *et al.*: "Attenuation free, dispersion shifted fiber doped with distributed erbium," *Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications (OAA '90)*, No. TuB 4, Monterey, CA (1990).
- 12) M. Morisawa, *et al.*: "Er³⁺-doped VAD fibers for lumped amplifiers and distributed transmission lines," *ibid.*, No. TuB 5 (1990).