

解説

光ファイバによる光増幅

中 沢 正 隆

NTT 伝送システム研究所光通信研究部 〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 162

(1989年3月7日受理)

Optical Amplification in Fibers

Masataka NAKAZAWA

Optical Communication Laboratory, NTT Transmission Systems Laboratories,
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-11

1. はじめに

今日の一般的な光通信システムは、発光部、中継部、受光部の三つの要素からなり、発光部と中継部、および中継部と受光部は光ファイバ伝送路で結ばれている^{1,2)}。中継部は伝送する信号光が光ファイバを伝播する際の損失およびパルス拡がりを補償するためのものであり、受光-電気増幅-発光で構成されている。最近、この再生中継の代わりに、光を直接増幅する光増幅器に関する研究が各国で盛んになってきている。これが実現すれば、簡単な構成で、かつ任意のビットレートの光通信(ビットレートフリー伝送)が実現できる可能性がある。また、光増幅器は従来の中継器に比べてたいへん安価にでき、光のブースタンプおよび受光器前段のプリアンプとして用いるならば、大幅な中継距離の拡大が図れる。

本稿では、今後の光通信技術に大きな変革をもたらすであろう光増幅に関して、光ファイバ増幅を中心に解説する。まず、半導体レーザーおよび光ファイバ中の非線形効果を用いた光増幅法について簡単に述べた後、最近目覚ましい発展がある希土類ドープファイバ増幅について重点的に述べる。

2. 各種光増幅方法の比較

長距離大容量光通信に向けての光の直接増幅方法としては、次の三つの方法がある。

- (1) 半導体レーザー増幅³⁻⁶⁾
- (2) 非線形光学効果を用いた光増幅^{7,8)}
- (3) 希土類ドープファイバ増幅

(1)の半導体レーザー増幅は、レーザーの両端面に無反射コーティングを施し、光増幅を行なうものである。三つの方法のなかで最も盛んに研究されてきており、 $0.8\ \mu\text{m}$ 帯では GaAs³⁾、 $1.3\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 帯では InGaAsP 半導体⁴⁾ が主な材料である。励起は電流注入で行なう。半導体レーザーが基本となるため非常に小さく(長さ $100\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$)、また、帯域が $50\sim 70\ \text{nm}$ と広いため数 ps の超短パルスの増幅ができる^{5,6)}。利得も $20\sim 30\ \text{dB}$ と大きい。しかし、利得の偏波依存性、温度依存性があること、光ファイバとの結合損が不可避であること、また、利得の recovery time が ps であるため高速応答に対して、波形歪みが発生する等の欠点もある。

(2)の非線形光学増幅には、主に、3次の非線形効果である誘導ラマン散乱、誘導 Brillouin 散乱、誘導 4 光子混合が用いられる^{7,8)}。これらの効果を誘起するには、 $100\ \text{mW}\sim 10\ \text{W}$ 程度の CW もしくはパルス光で光ファイバを励起する。このような非線形効果がファイバにおいて容易に観測されるのは、ファイバのコア径が $10\ \mu\text{m}\phi$ と小さいため、パワー密度が $1\ \text{MW}/\text{cm}^2$ になるためである。本増幅方法は、(1)の方法とは異なり、分布定数的な光増幅が行なえる特徴をもつ。したがって、光ファイバ自体が増幅媒体となっている。シリカ系ファイバの場合、誘導ラマン散乱のストークスシフト量は約 $440\ \text{cm}^{-1}$ であり、その利得係数は波長 $1\ \mu\text{m}$ において $1\times 10^{-11}\ \text{cm}/\text{W}$ である。入力を $1\ \text{W}$ とすると、長さ $1\ \text{km}$ の場合 $20\ \text{dB}$ 以上の利得が得られ、帯域的にもフェムト秒パルスの増幅が行なえるため、光ソリトンの増幅にも有効であると考えられている^{9,10)}。しかし、比較

的強い励起入力が必要とすること、偏波依存性がある等の短所もある。誘導ブリルアン散乱を用いた光増幅は、帯域が 100 MHz 以下と狭いため、短パルスの増幅には不向きであるが、逆に波長多重コヒーレント通信での狭帯域な波長選択光増幅に用いられる可能性がある¹¹⁾。また、誘導ラマン散乱に比べて小さい励起入力(数百 $\mu\text{W} \sim 100 \text{ mW}$) で大きな増幅効果が得られる。

(3)の希土類ドープ光ファイバ増幅は、光ファイバのコア部に Er^{3+} もしくは Nd^{3+} イオンをドープすることにより、それらイオンからの固有な遷移での誘導放出を用いるものである¹²⁾。本増幅器の使い方には、プースタンプ、光中継用アンプ、プリアンプの三つがある。いずれの場合にも、3~10 m 程度の長さで 10~40 dB の利得が容易に得られるため、各国で盛んに研究されている。以後、この希土類ドープファイバについて述べる。

3. 希土類ドープ光ファイバ増幅の特徴

コア部に希土類をドープした光ファイバが光増幅器およびレーザーとして適しているのは、

- (1) コア径が 10 μm 程度の細径であるため低い入力で励起密度を高くできること
- (2) 相互作用長が長くとれるため単位長さ当りの利得が小さくても十分な総合利得が得られること
- (3) MCVD, VAD 法等の優れたファイバ製造技術により低損失な導波路となっていること

等が挙げられる。最初のファイバレーザーの出現は比較的早く、クラウンガラスに Nd_2O_3 をドープしたものが Snitzer と Koester により 1964 年に発表されている¹³⁾。その後、Stone と Burrus によって、シリカ系の低損失ファイバにおいて波長 0.89 μm LED 励起により 1.06 μm の発振が報告され¹⁴⁾、今日では数多くのファイバレーザーおよび増幅器が出現するに至った。

希土類の 3 価のイオンを活性物質としたレーザー・ガラ

スは波長 2 μm 以下のさまざまな波長で遷移線を有する¹⁵⁾。特徴的な物質は Nd^{3+} と Er^{3+} イオンであり、それぞれのエネルギー準位を図 1 に示す。ガラス中の希土類元素は YAG または YLF 等の結晶の場合と異なり、複雑な結晶場の影響を受けて微細構造をもたない幅広い準位を示す。このため幅広い波長域にわたって光増幅が可能となる。 Nd^{3+} イオンは 4 準位を構成する波長 1.08 μm (${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$) と 3 準位である 0.9 μm (${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$) の遷移線がある。 Er^{3+} イオンは波長 1.53~1.55 μm (${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$) の遷移線が有名であり、この波長帯が光通信の最低損失波長帯(シリカ系ファイバにおいて 1.5 μm 帯)にあるため光通信への応用が期待されている¹⁶⁾。

希土類ドープファイバの作製法としては、MCVD 法と VAD 法の 2 種類がある¹⁷⁾。MCVD 法では NdCl_3 あるいは ErCl_3 の塩化物を熱分解させ、 GeCl_4 , SiCl_4 とともに堆積させる。一方、VAD 法ではコア用多孔質母材(スート)を NdCl_3 等の雰囲気中で透明ガラス化することによって作る。高濃度の希土類元素を添加するには、多孔質母材を希土類の塩化物を溶かした水、もしくはアルコールに含浸させてガラス化する方法がある。この方法によって数万 ppm の希土類が添加でき、さらに異なる希土類元素の共添加が可能である。

本光増幅器の長所としては、①比較的小さい励起光パワーで 10 dB 以上の高利得が得られる、②低雑音であり、温度変動による利得変化がほとんどない、③偏波依存性が小さい、④光ファイバとの結合損失が小さい、等がある。しかし、半導体レーザー増幅器に比べて、①帯域は狭い、②比較的小さいファイバ長が必要である、③励起のための光カップラーを必要とする、等がある。

Nd^{3+} ファイバには 0.9 μm 帯と 1.1 μm 帯の光増幅作用のほかに、 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ の間の波長 1.3 μm 帯遷移がある。1.3 μm 帯は現在の多くの光通信システムの波長帯であるためたいへん興味深い¹⁸⁾。 Nd^{3+} をドープしたフッ化物系ファイバ ZBLAN などは、1.3 μm でのレーザー発振が報告されているが¹⁸⁾、シリカ系 Nd^{3+} ファイバでは今のところ利得が非常に小さい。 Nd^{3+} ファイバについての詳細は文献 19~21) を参考にさせていただきたい。4 節からは、1.5 μm 帯の光増幅が可能な Er^{3+} ファイバ増幅について述べる。

4. Er^{3+} ファイバ光増幅器

Er^{3+} ドープファイバの吸収特性を図 2 に示す。0.5~0.6 μm 帯の吸収のほか、図に示す三つの特徴ある吸収帯がある。それらは、 ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ の 0.8 μm 吸収帯、

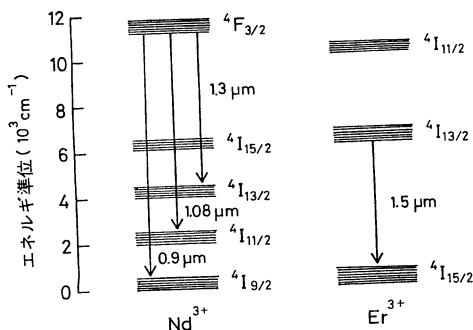


図 1 Nd^{3+} および Er^{3+} イオンのエネルギー準位

${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ の $0.98 \mu\text{m}$ 吸収帯, および ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ の $1.5 \mu\text{m}$ 帯の直接吸収帯である. おおのこの吸収線を利用した Er^{3+} 増幅の研究が各国で盛んに行なわれており, BTRL は $0.8 \mu\text{m}$ GaAs レーザーを用い 8 dB の利得を 20 mW の励起パワーで得ている²²⁾. しかし, この波長には, ESA (excited state absorption) が存在するために, ファイバが緑色に発光してしまい高効率な励起が難しい点もある²³⁾. サザンプトン大学のグループは, 波長 $0.98 \mu\text{m}$ の色素レーザーを用い, 24 dB の利得を 11 mW の励起入力で得ている²⁴⁾. この吸収線は

ESA がなく吸収係数も大きいので効率の高い励起が可能である. しかし, $0.98 \mu\text{m}$ での小型の励起光源が出現していないため, この波長域での半導体レーザーの出現が望まれている. われわれは $1.46 \sim 1.49 \mu\text{m}$ の直接吸収を用いて 10 dB 以上の高利得を実現している²⁵⁾.

光増幅の実験は, 基本的にはいずれも図3に示すような構成で行なっており, 励起光源の波長が異なるのみである²⁶⁾. 励起光は CW であり, 波長 $1.535 \mu\text{m}$ もしくは $1.552 \mu\text{m}$ に設定されたパルスもしくは CW 信号光はダイクロックミラーにより励起光と重ね合わされ, Er^{3+} ファイバに入射される. 信号光を同期検波することにより, 励起の on, off による利得を測定し, 光ファイバ中の線形損失を差し引いて正味の利得を出す. 図4は励起光として Ar レーザー ($\lambda = 514 \text{ nm}$) を用い, 信号光を送らずに Er^{3+} からの蛍光 (fluorescence もしくは ASE; amplified spontaneous emission) を測定した結果であり, 波長 $1.535 \mu\text{m}$ と $1.552 \mu\text{m}$ にピークをもつ特性となる. この二つのピークの波長において有効な光増幅が行なえる. 波長 $1.535 \mu\text{m}$ のほうの帯域は, $3 \sim 5 \text{ nm}$ と狭いが, ピークでの利得は高い. 一方 $1.552 \mu\text{m}$ の帯域は 10 nm と広いがピークでの利得は狭い.

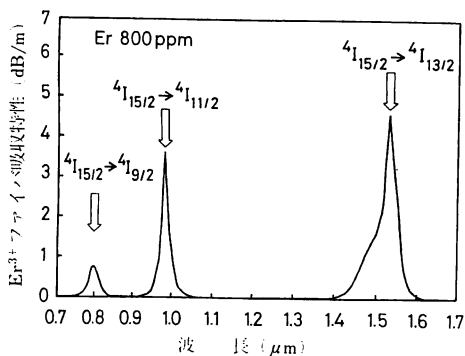


図2 Er^{3+} ドープファイバの吸収特性

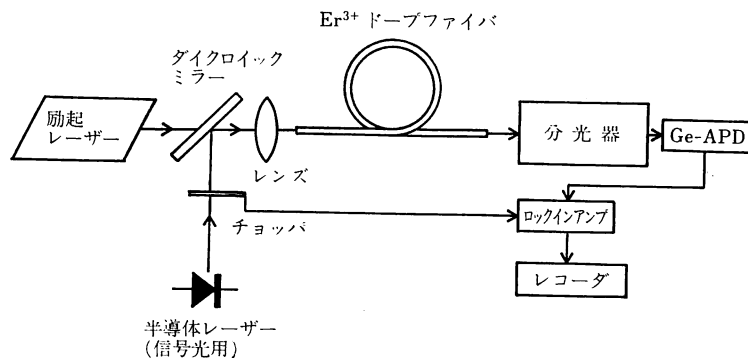


図3 希土類ドープ光ファイバ増幅の実験系

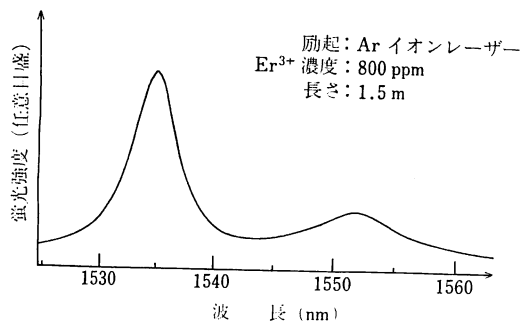


図4 Er^{3+} ドープファイバの蛍光特性

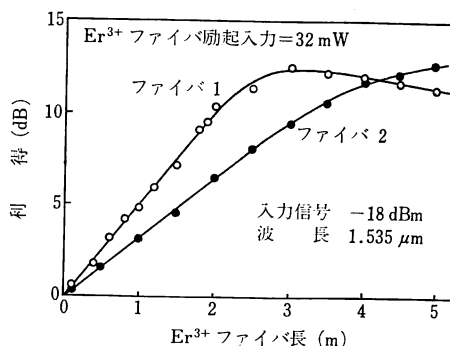


図5 Er^{3+} ドープファイバの光増幅特性

Er³⁺ イオンを 1370 ppm ドープしたファイバ(ファイバ1)と 1000 ppm ドープしたファイバ(ファイバ2)における波長 1.535 μm での利得特性を図5に示す²⁵⁾. 励起には発光スペクトルが 1.46~1.48 μm にわたる InGaAsP 半導体レーザーを用いている. 本レーザーは共振器長を従来の 200 μm から 1 mm 程度まで長くし, さらに出射側に AR コート(反射率~5%), 裏面に 100% 反射コートを施したフアブリ-ペロー型である. 励起入力は 32 mW である. Er の濃度が濃いファイバ1の場合, ファイバ長 3 m のとき約 13 dB の利得が得られている. さらにファイバ長を増加しても, 励起光の吸収が大きくなるため利得は徐々に減少していく. 濃度が 1000 ppm の場合には長さ 5 m において 13 dB の利得が得られている. 最大利得が得られるファイバ長は, 濃度が薄いためファイバ1に比べて長くなっている. 最近では, ファイバ長を 10 m にして波長 1.552 μm において約 20 dB の利得が得られている.

5. Er³⁺ ファイバ光増幅器の雑音特性

Er³⁺ ファイバを光増幅器として光通信に用いる場合, その雑音特性を把握することが重要である. 一般に光増幅器からの出力は, 増幅された信号光と広いスペクトル幅をもつ ASE (amplified spontaneous emission) からなる. 光検出の際発生する雑音は, ① 増幅された信号光のショット雑音, ② ASE によるショット雑音, ③ ASE のスペクトル成分と増幅された信号光との光混合によって発生する signal-spontaneous ビート雑音, ④ ASE のスペクトル成分の間の spontaneous-spontaneous 雑音の四つから成る. ③の雑音は信号光の帯域の中に入ってくるため, 光フィルタによっては除去できない. しかし, ④の雑音は広い帯域にわたって発生するため, 狭帯域の光フィルタにより除去できる. したがって, 低い信号光により③を低減し, さらに狭帯域フィル

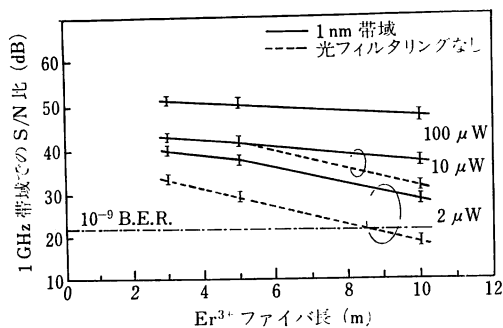


図6 Er³⁺ ドープファイバの雑音特性の測定結果

タによって④を低減することにより, 低雑音の光増幅ができる.

Laming らの雑音測定の結果を図6に示す²⁷⁾. 信号光入力が高く 100 μW (-10 dBm) の場合, すべての Er³⁺ ファイバ長において光フィルタを用いても S/N 比は一定であり, 雑音は signal-spontaneous ビート雑音で決定されている. 入力が 10 μW (-20 dBm) の場合, 短いファイバ長では S/N 比はスペクトルフィルタリングに対して一定であるが, 長いファイバにおいてはフィルタリングにより改善が見られている. これは, Er³⁺ ファイバが長くなることにより反転分布が場所に著しく依存するようになり, 逆方向励起の場合 ASE の増加が顕著になるためである. 一番低い入力 2 μW (-27 dBm) の場合, 光フィルタにより S/N 比の著しい改善が見られるが, これは spontaneous-spontaneous ビート雑音が主となるためである.

S/N 比に関しては, 1 GHz の帯域の場合, Er³⁺ ファイバへの入力が -10 dBm および -40 dBm に対して 52 dB および 26 dB の S/N 比が得られている. 10⁻⁹ の bit error rate を達成するためには約 22 dB の S/N 比が必要であるが, この場合十分 -40 dBm の受光感度を実現できることになる. したがって, 通常の Ge-APD の光検出器では -32~-33 dBm 程度の受光感度であるので, 全体として 7~8 dB の受光感度の改善が可能となる²⁷⁾.

Er³⁺ ファイバ増幅の雑音指数についても理論的な研究がされており, 図7に示す結果が得られている²⁸⁾. 横軸に Er³⁺ ファイバ長, 縦軸に雑音指数をとり, 順方向励起と逆方向励起の場合の雑音指数の変化を示している. 励起入力 100 mW, 信号光入力は 1 μW (-30 dBm) に設定してある. これによると順方向励起の雑音指数の変化は小さく, 3 dB の量子限界より約 0.2 dB 高いだけの低雑音増幅が可能であることがわかる. 逆方向励起

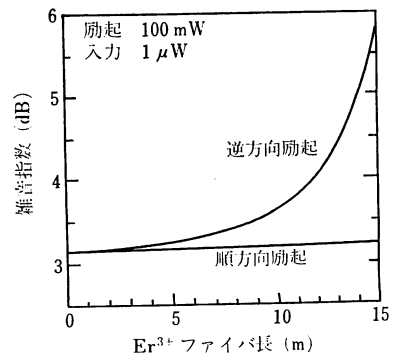
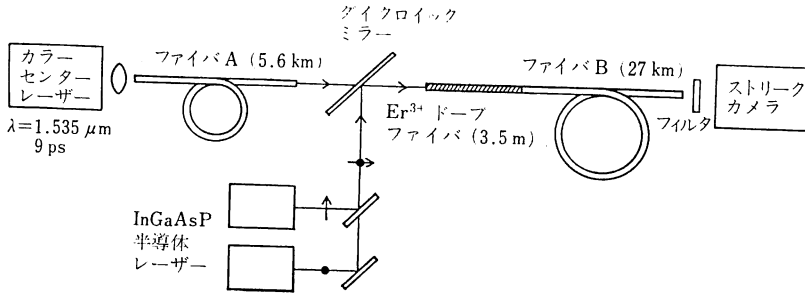


図7 Er³⁺ ドープファイバ光増幅における雑音指数

図 8 Er^{3+} ドープファイバ増幅による光ソリトン伝播

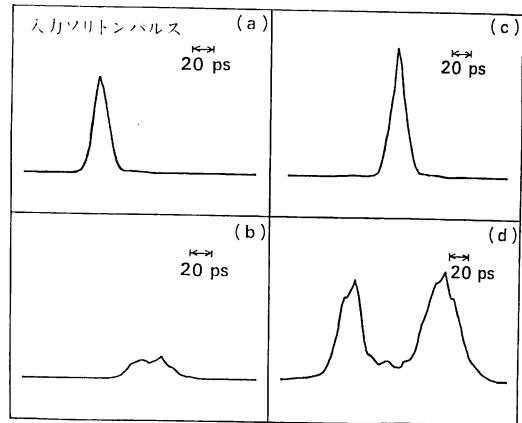
の場合は、 Er^{3+} ファイバ長を長くすると増加する。これは前述した反転分布の長さ依存性に起因している。低雑音にするには短いファイバ長でなければならないが、これでは利得は大きくとれない。したがって、低雑音・高利得の Er 光増幅のためには、順方向励起のほうが優れている。

この特性を利用し、NTT の Hagimoto らは 1.8 Gbit/s の IM 変調方式により世界で初めて 212 km の無中継伝送に成功した²⁹⁾。彼らは Er^{3+} ファイバをブースタアンプおよび APD のプリアンプとして用い、コヒーレント通信と同等の最低受信感度 -38 dBm を実現している。

6. Er^{3+} ファイバによる光ソリトン増幅

従来光ソリトンの増幅には前述した誘導ラマン散乱が用いられてきた。しかし、ラマン散乱の励起のためには、現在の半導体レーザーの出力では利得が大きくとれない欠点があった。最近 Er^{3+} ファイバにおいて 50~200 mW 程度のソリトンピークパワーをもつパルスが十分増幅でき、10 dB 以上の利得が得られることが明らかにされ、新しいソリトン伝送方式が提案されるに至った³⁰⁾。その構成を図 8 に示す。ソリトンの発生には波長が $1.535 \mu\text{m}$ に設定されたカラーセンターレーザーを用い、その幅は約 10 ps である。ソリトンは長さ 5.6 km のファイバ A を伝播することにより、その振幅が減少する。しかし、その後設置した Er 増幅器により増幅され、ファイバ B 中を伝播してストリークカメラにより受光される。この系では、 $N=1$ ソリトンのダイナミックレンジを使ってソリトンの中継伝送を行なっているが、数 km~数十 km の分布定数的な増幅も Er^{3+} イオンのドープ量を減らすことにより可能である。

図 9 にソリトンの伝播結果を示す³⁰⁾。(a) はファイバ A への入射ソリトン波形、(b)~(d) は Er^{3+} ファイバへの入力を増加した場合 (すなわち、増幅度を増すにつ

図 9 Er^{3+} ファイバによる光ソリトンの伝播結果

れて) どのように波形が変化していくかを示している。励起入力弱い場合、出力波形の振幅は小さく、また、パルス幅も入力に比べて 42 ps 程度に広がっている。これは、ファイバ B への光パルス振幅がソリトンレベルに比べて小さいため、波形がファイバの群速度分散によって広がっていることを示す。 Er^{3+} ファイバへの励起入力を増すと、増幅度が大きくなり、出力波形が(c)に示すように変化する。この条件では、出力パルス幅は入力ソリトンパルスの幅とほぼ同じであり、光ソリトンが伝播している。光損失を 0.22 dB/km として波形解析を行なったところ、ソリトン次数 $N=1.5$ のソリトンが Er^{3+} ファイバにより励振され、ファイバ B 中を伝播していることがわかった。 $N=1.5$ の光ソリトンは伝播するにつれ、いったんパルス幅は初期値よりも狭くなるが、光損失のため約 25 km 先で入射ソリトンと同じパルス幅となる。長さ 25 km の損失は約 5.5 dB であるが、 $N=1$ のソリトンのダイナミックレンジは約 9.5 dB ($10 \log(1.5/0.5)^2$) であるため、25 km 先においてもソリトンとして取り扱ってよい。このように中継伝送されたソリトンは再び Er^{3+} ファイバにより増幅され $N=1.5$ のソリトンとして送り出される。 Er^{3+} ファイバの

増幅度を増すと(d)に示した双峰性のパルスとなる。これは、増幅度が高いために高次ソリトンが励振されたもので、計算機シミュレーションを行なった結果、 $N=4$ のソリトンが励振されたことがわかっている³⁰⁾。

7. ま と め

Er^{3+} ファイバ増幅を中心に最近話題になっている光ファイバ増幅について述べた。 Er^{3+} ファイバ増幅の特徴として、光通信の最低損失波長域 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯において増幅が可能であること、増幅度が高いこと、In-Line 形の増幅器であるため挿入損が低いこと、偏波依存性がほとんどないこと、が挙げられる。また、低雑音増幅器であるため、多段増幅も可能である。本光増幅器では、200 km を越える無中継伝送ならびに光ソリトンのような高いピークパワーをもつパルスの増幅も可能であるため、今後、線形から非線形まで幅広い応用が期待される。

文 献

- 1) 末松安晴, 伊賀健一: 光ファイバ通信入門 (オーム社, 東京, 1976).
- 2) 島田禎吾: 光通信技術読本 (オーム社, 東京, 1980).
- 3) T. Mukai and Y. Yamamoto: IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 1028.
- 4) T. Saitoh and T. Mukai: IEEE J. Quantum Electron., **QE-23** (1987) 1010.
- 5) M. P. Kesler and E. P. Ippen: Appl. Phys. Lett., **51** (1987) 1765.
- 6) J. M. Wiesenfeld, G. Eisenstein, R. S. Tucker, G. Raybon and P. B. Hansen: Appl. Phys. Lett., **53** (1988) 1239.
- 7) Y. Aoki: IEEE J. Lightwave Technol., **LT-6** (1988) 1103.
- 8) 中沢正隆: 応用物理, **56** (1987) 1265.
- 9) A. Hasegawa: Appl. Opt., **23** (1984) 3302.
- 10) L. F. Mollenauer, R. H. Stolen and M. N. Islam: Opt. Lett., **10** (1985) 229.
- 11) N. A. Olsson and J. P. Van der Ziel: Appl. Phys. Lett., **48** (1986) 1329.
- 12) S. B. Poole, D. N. Payne and M. E. Fermann: Electron. Lett., **21** (1985) 737.
- 13) C. J. Koester and E. Snitzer: Appl. Opt., **3** (1964) 1182.
- 14) J. Stone and C. A. Burrus: Appl. Opt., **13** (1974) 1256.
- 15) 木村康郎, 中沢正隆: 第31回微小光学特別研究会(1989) p. 7.
- 16) 中沢正隆: 日本レーザー学会, 学術講演会第9回年次大会(1989) 27a 18.
- 17) 吉田 実, 小尾一也, 御前俊和, 田中祐幸, 新谷 健: 量子エレクトロニクス研究会, OQE 88-95 (1988) p. 69.
- 18) W. J. Miniscalco, L. J. Andrews, B. A. Thompson, R. S. Quinby, L. J. B. Vacha and M. G. Drexhage: Electron. Lett., **24** (1988) 28.
- 19) R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole and D. N. Payne: Electron. Lett., **21** (1985) 738.
- 20) Y. Kimura and M. Nakazawa: Jpn. J. Appl. Phys., **26** (1987) L 1253.
- 21) I. P. Alcock, A. I. Ferguson, D. C. Hanna and A. C. Tropper: Opt. Lett., **11** (1986) 709.
- 22) T. J. Whitley: Electron. Lett., **24** (1988) 1537.
- 23) D. C. Hanna, R. M. Percival, I. R. Perry, R. G. Smart and A. C. Tropper: Electron. Lett., **24** (1988) 1068.
- 24) R. I. Laming, *et al.*: European Conf. on Optical Communication, ECOC '88, Brighton, UK (1988) PDP. 25.
- 25) M. Nakazawa, Y. Kimura and K. Suzuki: Appl. Phys. Lett., **54** (1989) 295.
- 26) Y. Kimura and M. Nakazawa: J. Appl. Phys., **64** (1988) 516.
- 27) R. I. Laming, P. R. Morkel, D. N. Payne and L. Reekie: Euroean Conf. on Optical Communication ECOC '88, Brighton, UK (1988) 54.
- 28) R. Olshansky: Electron. Lett., **24** (1988) 1364.
- 29) K. Hagimoto, K. Iwatsuki, A. Takada, M. Nakazawa, M. Saruwatari, K. Aida, K. Nakagawa and M. Horiguchi: Optical Communication Conference, OFC '89, Houston U. S. A. (1989) PD 15.
- 30) M. Nakazawa, Y. Kimura and K. Suzuki: Electron. Lett., **25** (1989) 199.