

最近の技術から

光ファイバレーザー

中 沢 正 隆

NTT 電気通信研究所 〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 162

1. ま え が き

光ファイバを用いた通信システムの広範囲な実用化に伴い、超高速光エレクトロニクス、非線形光学、光センサー等数々の応用研究が盛んになってきている。なかでも各種光ファイバをレーザー媒質として用いるファイバレーザーについては低閾値化、発振波長域、波長可変性等に大きな進歩が見られる。本稿では最近新たな展開をみせている各種光ファイバレーザーについて述べる。

2. 光ファイバレーザーとその特徴

コア部とクラッド部を有する光ファイバがレーザーとして適しているのは、(1)コア径が 10~50 μm 程度の細径であるため 1 W の入力に対して励起パワー密度が 1 MW/cm² と高光強度となる。(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。(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等が掲げられる。最初の光ファイバレーザーの出現は比較的早く、コア部に Nd₂O₃ をドーブしたものが Snitzer と Koester により 1963~64 年にかけて発表されている¹⁾。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、今日では数多くのファイバレーザーが出現するに至った。以下では、ファイバレーザーをファイバ構成材料の点で分類した稀土類ドーブファイバレーザー、単結晶ファイバレーザー、プラスチックファイバレーザー、およびファイバの特徴を有効に発揮する非線形光学利用のファイバレーザーについて概説する。

2.1 稀土類ドーブファイバ

稀土類の 3 価のイオンを活性物質としたレーザーガラスは 2 μm 以下のさまざまな波長で発振線を有する。特徴的な物質は Nd³⁺ イオンであり、4 準位を構成する波長 1.06 μm の発振線と、3 準位で構成される 0.9 μm の発振線とがある。通常のシリカ系単モードファイバを MCVD 法で作る過程において Nd (NdCl₃) をコア部に 300 ppm 程度ドーブすることにより Nd ファイバを作製できる²⁾。励起光として 0.514 μm Ar レーザーを

用いると 1.088 μm (閾値 ~0.5 mW) および 0.95 μm において発振する。連続発振が難しい 3 準位系の 0.9 μm 帯 (⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2}) についても、ファイバの高光強度性により連続発振が可能となっていることは注目に値する。ファイバ共振器内部に超音波光偏向器を挿入した Q スイッチおよびモード同期パルス発生や複屈折フィルタを挿入した波長可変な発振 (0.9~0.95 μm , 1.07~1.14 μm) も実現されている³⁾。

光ファイバ通信における最低損失波長は 1.55 μm 帯であるためその波長で発振するファイバレーザーが実現できれば、OTDR 用光源、ファイバ光増幅素子など有効なツールとなる。Er³⁺(⁴I_{13/2}-⁴I_{15/2}) は 1.54 μm にて発振線を有しており、Nd レーザー同様 0.514 μm 励起にて発振が可能となっている。その蛍光特性は 1.534 および 1.549 μm にピークをもちその寿命は 8~12 ms である^{4,5)}。Er レーザーは 3 準位レーザーであるため連続発振がバルク材料では難しいが、ファイバレーザーでは 30 mW 程度の閾値で室温連続発振が可能となっており、回折格子の挿入により波長も 1.53~1.55 μm の範囲で可変である。日本においても Nd³⁺, Er³⁺ ファイバレーザーについては研究が始まっている⁵⁾。また、2 μm 帯の発振波長を有する Ho³⁺ ファイバも研究されている。

2.2 単結晶ファイバレーザー

スタンフォード大学の Byer らのグループは CO₂ レーザー光を用いて種材料を融解し、引き上げ冷却する方法 (pedestal growth technique) により、Al₂O₃, Cr: Al₂O₃, Nd: YAG, LiNbO₃ 等の単結晶ファイバを作製している⁶⁾。ファイバ径は 20 μm 程度で 3~20 cm の長さになる。サファイアファイバは 0.2~3 μm の広い透過域を有しており単結晶にもかかわらず可とう性がよく、また融点が 2,045°C であるため超高温の環境でも使用可能となっている。径 60 μm 長さ 15 mm のルビーファイバレーザーも 77 K で発振 ($\lambda=693 \text{ nm}$) が報告されるとともに Nd: YAG レーザーについては $\lambda=590 \text{ nm}$ の励起波長に対して閾値 3.7 mW, 効率 10.5% のものが得られている。LiNbO₃ は高効率なファイバ導波路型光変調器として、また SHG 発生用として用いられ、SHG 発生については 25 μm 径 5 cm のファイバで従来

の 50 倍の効率が得られている。また、温度勾配による LiNbO₃ ファイバ中での強誘電体ドメインの形成についての研究も盛んである⁷⁾。現在単一モードファイバ化、クラッド部の付与が重要な研究テーマとなっている。

2.3 プラスチックファイバレーザー

プラスチックファイバのコア部またはクラッド部にレーザー色素を含ませることにより、従来の色素レーザー同様の波長で発振するレーザーが報告されている⁸⁾。色素材料として POPOP, プラスチックコア材としてポリスチレン ($n=1.60$), クラッド材料として PIBMA ($n=1.48$) を用いたファイバレーザー (長さ 5 cm) の場合、紫外 N₂ レーザー光の励起により 410~420 nm の中心波長のパルス発振に成功している。PMMA コアと R 6 G を混入した PIBMA クラッドの組合せによる活性クラッド型レーザーも考えられている。

2.4 非線形光学を利用したファイバレーザー

光ファイバ中では 1 MW/cm² 程度の光強度が容易に実現できるため、誘導ラマン散乱, 誘導ブリルアン散乱 (SBS), 4 光子混合 (FPM), 自己位相変調効果 (SPM) が観測される。なかでも SRS はレーザーとしての性能に優れ, シリカ系ファイバの場合ストークスシフト量 440 cm⁻¹, その利得係数は波長 1 μm において約 1×10^{-11} cm/W である。長さ 1 km, 入力 1 W として容易に 20 dB 以上のラマン利得が得られるため, ファイバラマンレーザーに関しては数多くの報告がある⁹⁾。コア部にドープするものが GeO₂ の場合, 1.06 μm 励起にて 1.12 μm の発振, P₂O₅ の場合, 1,400 cm⁻¹ のストークスシフトにより 1.25 μm での発振が得られる。ドープメントを変えることにより容易に発振波長を変えることができ, またラマン利得帯域内では波長可変となる。誘導ブリルアンレーザーは励起光が光ファイバ中での音響フォノンと相互作用して 20~30 GHz 程度周波数シフトしたストークス光を発生する。当初 CS₂ を充填した液体コアファイバを用いたが, 今日では低損失シリカファイバを用いて閾値が数 mW のものが報告されている¹⁰⁾。

自己位相変調効果が観測されると, 光パルスの立上りでは周波数はより低く, 立下りでは周波数は高いチャープパルスに変形される。このパルスが負の群速度分散媒質を通過するとパルスが圧縮されて両者がつり合い, 包絡線ソリトンが形成される¹¹⁾。このソリトンは非線形シュレディンガー方程式で記述され, $N=1$ ソリトンは sech パルスとなる。波長 1.55 μm ではファイバ自体が負の群速度分散を有するので, この波長域では安定なソリトンが存在する。レーザー共振器の一部にソリトン効果を利用した波形整形用の光ファイバを挿入したファイ

バレーザーが出現し, つい最近, 著者らは SRS の効果を用いたファイバラマンソリトンレーザーについて報告している¹²⁾。ラマン励起光源には波長 1.48 μm 付近で発振するモード同期カラーセンターレーザーを用い, そのパルス列をリング共振器に入射する。ラマン利得が共振器の損失より十分大きければ波長 1.55 μm のストークスパルスが立ち上がり, その尖頭値が SPM を引き起こすのに十分な値であれば, 最終的に $N=1$ ソリトンが形成され超短パルスを発生できる。

3. ファイバレーザーの将来

各種ファイバレーザーの応用としては光の増幅, レーザージャイロ等のセンサーがある。一般には, ファイバ内でのモード体積が小さいため (通常のレーザーに比べて 10⁻³ 以下) 出力が小さい欠点があるものの, その反面, 可とう性があり単一モードファイバを用いると横モードがきれいなガウスビームとなる利点がある。さらに, ガラスファイバレーザーの場合は数 nm の波長可変が可能であり, 端面を研磨してレーザー鏡用蒸着を施せば容易にレーザー共振器が構成できる。エネルギー密度が高いことを用いればフッ化物系ガラスを用いて将来 2~3 μm の 3 準位レーザーの連続発振の可能性がある。また, 光コンピュータ論理素子として Nd ファイバレーザーバンドル (1 万本を束ねたファイバレーザープレート) も提案されており¹³⁾, その将来は明るい。

文 献

- 1) C. J. Koester and E. Snitzer: Appl. Opt., **3** (1964) 1182.
- 2) S. B. Poole, *et al.*: Electron. Lett., **21** (1981) 737, see also 739.
- 3) I. P. Alcock, *et al.*: Electron. Lett., **22** (1986) 268; see also Opt. Lett., **11** (1986) 709.
- 4) L. Reekie, *et al.*: J. Lightwave Technol., **LT-4** (1986) 956.
- 5) 吉田 実, ほか: 電子通信学会 62 年度春期総合全国大会; 木村康郎, ほか: 応用物理学会 62 年度春期総合全国大会.
- 6) M. M. Fejer, *et al.*: Rev. Sci. Instrum., **55** (1984) 1791.
- 7) Y. S. Luh, *et al.*: J. Cryst. Growth, **78** (1986) 135.
- 8) 武藤真三, ほか: 応用物理, **56** (1987) 115.
- 9) M. Nakazawa: Appl. Phys. Lett., **46** (1985) 628.
- 10) D. Cotter: J. Opt. Commun., **4** (1983) 1.
- 11) A. Hasegawa and F. Tappert: Appl. Phys. Lett., **23** (1973) 142.
- 12) H. A. Haus and M. Nakazawa: J. Opt. Soc. Am. B, to be published in May issue (1987).
- 13) A. Seko and A. Sasamori: Appl. Opt., **18** (1979) 2052.

(1987 年 2 月 13 日受理)