

# フッ化物ガラス光ファイバの最近の動向

住友電気工業(株) 横浜研究所  
大西 正志

## Recent Progress on Fluoride Glass Optical Fiber

Masashi Onishi

Yokohama Research Laboratories  
Sumitomo Electric Industries, Ltd.

### Abstract

Since fluoride glass was discovered at Rennes University, France, so much effort has been made in order to realize stable glass compositions for fibers and their transmission loss reduction. Although it has been reported in some papers that attenuation less than 1dB/km had been attained, it seems to be still difficult to realize theoretically estimated attenuation as low as 0.01dB/km around  $2.5 \mu\text{m}$ . On the other hand, rare-earth doped fluoride glass fibers for active or passive components have been actively studied, and remarkable results were reported. In this chapter, recent progress on fluoride glass fibers for various applications was reviewed as well as challenge for ultra low loss.

### 1. はじめに

1975年にフランスのレンヌ大学でZrF<sub>4</sub>系フッ化物ガラスが発見されて以来、約20年間に渡ってこのガラスの光ファイバ化、またその低損失化が精力的に進められてきた。フッ化物ガラス光ファイバでは、レーリー散乱から理論的に予測される伝送損失が現在光ファイバとして実用化されている石英ガラスの場合の約1/10以下となることから、次世代の極低損失光ファイバとして期待されてきた。しかしながら、フッ化物ガラスは他の酸化物ガラスなどと比較して結晶化し易いために、その低損失化の道は極めて険しい。本章では、フッ化物ガラス、光ファイバの低損失化の現状と課題、更に現在活況を呈している希土類元素添加フッ化物光ファイバにつ

いて概観する。

### 2. 低損失化の現状

これまでのフッ化物光ファイバの低損失化の経緯をFig.1に示す。1980年以降、伝送損失は順

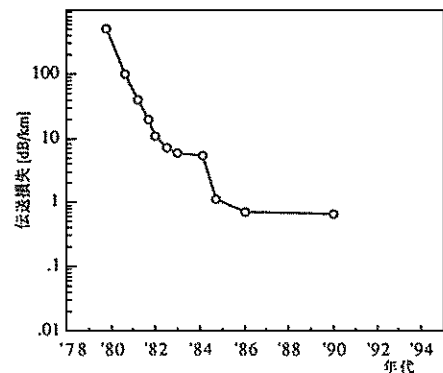


Fig.1 Transmission Loss Improvement of Fluoride Optical Fiber

〒244 横浜市栄区田谷町1  
TEL: 045-853-7166

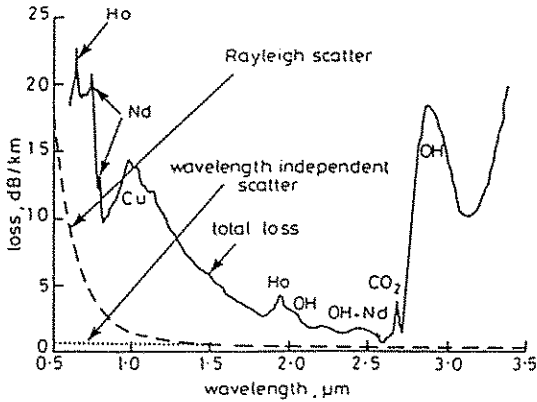


Fig. 2 Attenuation Spectrum of 110m Length Fluoride Glass Fiber(2)

調に低減されてきたものの、1986年に0.7dB/kmが達成されてからは<sup>(1)</sup> ほぼ横這いの状態となっていることが判る。Fig. 2には現状のベストデータである、0.65dB/kmが得られたフッ化物物光ファイバの損失・波長依存性を示している<sup>(2)</sup>。最低損失値が得られる2.5 $\mu$ m帯では、希土類及び遷移金属元素、OH基、CO<sub>2</sub>による吸収損失が約0.33dB/km存在している他に、微結晶によると考えられる約0.30dB/kmの波長無依存の散乱損失が認められている。現在、フッ化物物光ファイバの母材は主として粉末原料を溶解した後、融液を鑄型へキャストする

ことにより作製されている。従ってこれらの損失要因を完全に除去するためには、使用するフッ化物原料の精製技術の向上は勿論のこと、溶融中の容器等からの不純物混入にも十分配慮して、最終的にはファイバ中の金属不純物をサブppbレベルまで低減しなければならない。また散乱損失の低減の為に、原料中の酸化物の低減はもとより、母材作製及び線引工程での熱履歴を十分に検討してサブ・ミクロンサイズの微結晶析出を抑制する必要があり、技術的に非常に難しい。一方これらの問題点を解決すべく、気相法による母材合成も試みられている<sup>(3)</sup>。例えばFig. 3に示すように、ZBLAN組成を構成する有機金属化合物を気化させてフッ素系ガスと共にフッ化物ガラス管の中に導入し、Arガスプラズマ中で反応させることによって、ガラス管の内壁にZBLAN組成のガラス膜を堆積させることに成功している。フッ化物物光ファイバに於ける極低損失の追求については現在のところ僅かな数の研究機関でのみ継続されているが、この様な新たな試みがブレーク・スルーとなって永年の夢が実現されることが期待される。

### 3. 希土類元素添加フッ化物物光ファイバ

フッ化物ガラスは他の酸化物ガラスなどと比べてフォノン・エネルギーが小さいという特徴

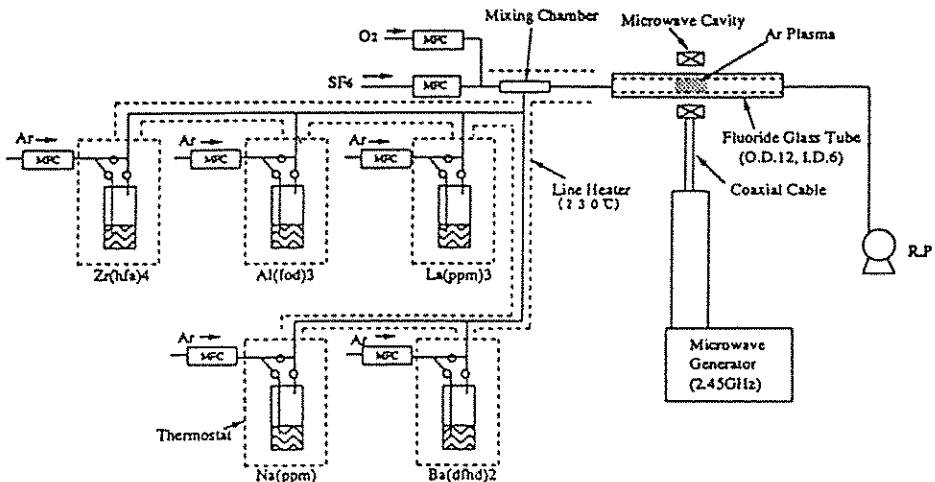


Fig. 3 Schematic Diagram of PCVD Apparatus for Fluoride Glass Fiber Preform(3)

から、希土類元素を添加してこれをある波長の光で励起することにより種々の蛍光スペクトルが観測されている。近年では、これまで培われた低損失化の技術を用いてコアに希土類元素を添加したフッ化物光ファイバによる光増幅器、レーザーの開発が極めて盛んに行われており、本項ではこの分野に於ける最近の動向について述べる。

### 3-1. 光増幅器への応用

#### (a) 1.3 μm 帯光増幅器

光増幅器は光通信システムの大容量化と高機能化には不可欠なものであり、現在最も広く用いられている信号光波長である 1.3 μm 帯の光増幅器の実用化が大いに期待されている。これまで Nd (ネオジウム) と Pr (プラセオジウム) をフッ化物光ファイバのコアに添加することにより 1.3 μm 帯の信号光の増幅が実現されている<sup>(4) (5)</sup>。Fig. 4 には Nd と Pr のエネルギー単位図を示す。Nd については、 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  の遷移による誘導放出を用いて光増幅が行われる。Nd を石英ガラスに添加した場合、この遷移は 1.4 μm 付近に現れる他、ESA 遷移の強度も大きく現状の 1.3 μm 帯光システムには使えない。一方 Nd を ZrF<sub>4</sub> 系フッ化物ガラスに添加した場合では、発光の中心波長が 1.32 μm にシフトすると共に、

BSA 強度も小さくなるために 1.3 μm 帯の信号光の増幅が可能となる。しかし Fig. 5 に示す利得スペクトルからも判る様に、1.31 μm 以下の波長領域では前述の BSA の影響を受けて利得が小さく、現状の 1.3 μm の帯光システムの通信波長帯域を完全にカバーできないことが判る。Pr の場合には  ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_5$  の遷移を用いて 1.3 μm 帯の光増幅が行われる。Pr のホストガラスとして石英ガラスを用いた場合には、そのフォノン・エネルギーが約 1100 cm<sup>-1</sup> と高いために殆ど発光しないが、フッ化物ガラスのフォノン・エネルギーは約 500 cm<sup>-1</sup> と小さいために輻射遷移確率が大きくなり、1.3 μm 帯の光増幅が可能となる。Pr 添加フッ化物光ファイバの利得スペクトルは、Fig. 5 に示すように 1.3 μm 帯通信波長帯域を十分カバーしており、1.3 μm 帯光増幅器として現在最も注目されている。Fig. 6 には NTT から報告されている 1.3 μm 帯光増幅器 (PDFA) モジュールの構成を示しているが<sup>(6)</sup>、Pr の発光遷移の量子効率が数% と非常に小さいことから、Pr を添加するフッ化物光ファイバのコアとクラッドとの比屈折率差を 2.5% にまで高くすることによって、励起光のパワー密度を上げている。また低雑音と高出力を両立させる目的で、Pr 添加フッ化物光ファイバは 2 つの部分に分けられ、その間には光アイソレータが挿入されている。PDFA

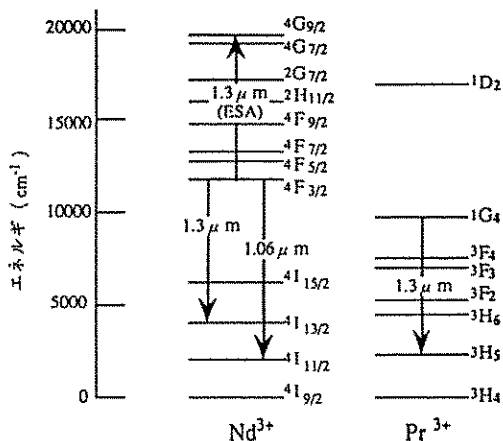


Fig. 4 Energy Diagram of Nd and Pr

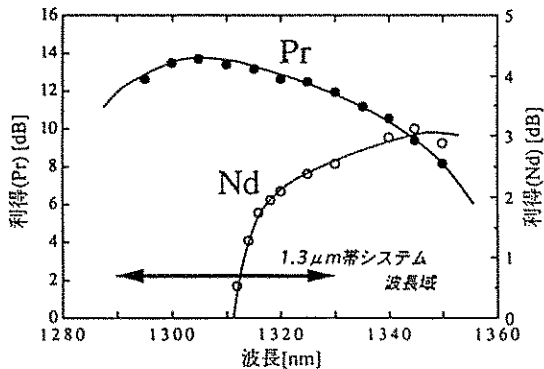


Fig. 5 Gain Spectra of Pr or Nd Doped Fluoride Glass Fibers

に於ける問題点としては、Prを励起する波長 1.017  $\mu\text{m}$  の高出力な半導体レーザーの作製が困難であるため、現状では固体レーザー(Nd:YLF)が主として用いられている点が挙げられ、小型化が可能な半導体レーザーの製造安定化が期待されている。さらにこのPDFFAを用いたデジタル及びアナログ伝送実験も試みられており<sup>(6) (7)</sup>、デジタル伝送では10Gb/sの高速デジタル信号の伝送距離を 110kmまで延ばせることが確認されている。一方、現状のZrF<sub>4</sub>系フッ化物ガラスよりも更にフォノン・エネルギーの小さいホストガラスを用いて 1.3  $\mu\text{m}$  帯光増幅の利得効率が向上させようとする研究も盛んに行われている。Fig. 7 は種々のホストガラスのフォノン・エネルギーと多フォノン緩和の寿命(計算値)を示したものであ

るが<sup>(8)</sup>、現在ではInF<sub>3</sub>系ガラス及びカルコゲナイドガラスなどを中心として、これらのガラスの光ファイバ化及びその低損失化が進められている<sup>(9)</sup>。

(b) 1.55  $\mu\text{m}$  帯光増幅器

1.55  $\mu\text{m}$  帯は光通信の伝送路となる石英系光ファイバの伝送損失が最低となる波長帯であり、数年前よりこの波長帯を用いた光システムの敷設が開始された。1.55  $\mu\text{m}$  帯の光増幅器は、Br (エルビウム) をコアに添加した石英系光ファイバによって既に実用化されている。一方通信需要は近年増え続ける傾向にあり、光ファイバの情報伝送量をさらに大きくするための波長多重 (WDM) 通信方式が活発に検討されている。この WDM 方式は1.55  $\mu\text{m}$  帯に於いて多数の波長の信号光を同時に伝送

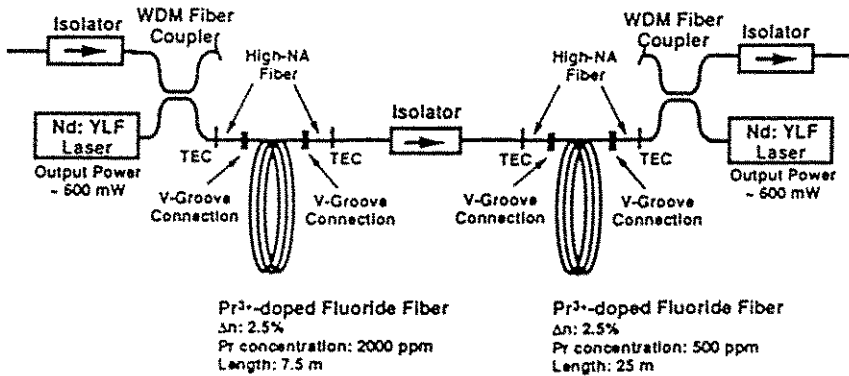


Fig. 6 Configuration of PDFFA Module(6)

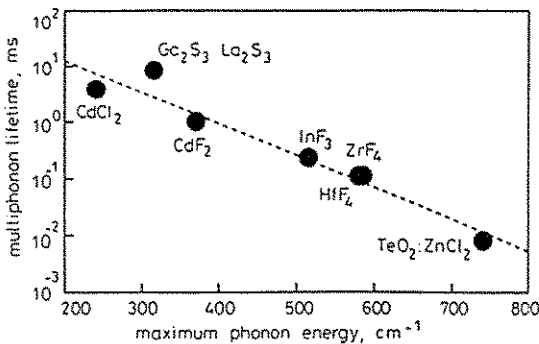


Fig. 7 Calculated Multiphonon Lifetimes as function of maximum phonon Energy for Each Glass Host(8)

するものであり、その際光ファイバ増幅器の増幅帯域が出来るだけ広いことが好ましい。現在実用化されている石英ガラスをホストとしたEr添加光ファイバ増幅器 (EDFA) ではその増幅帯域は15~20nmである一方、フッ化物ガラスをホスト材料とした場合には1533nm~1558nmまで約25nmの広帯域が実現される (Fig. 8)。そして実際にコアにBrを添加したZrF<sub>4</sub>系のフッ化物ガラス光ファイバを用いて光ファイバ増幅器を構成し、1波長あたり 2.5Gb/s のデジタル信号を16波多重し、 440

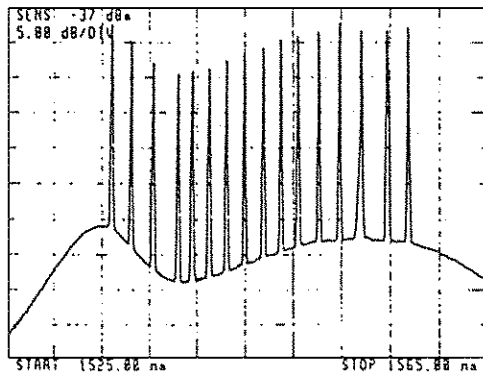
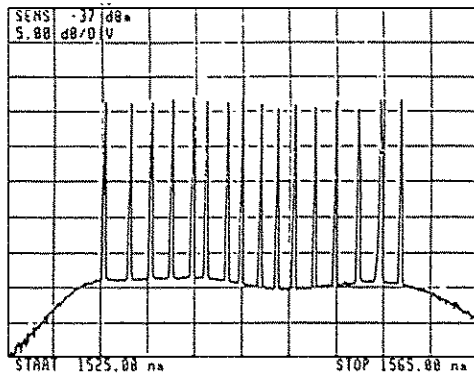


Fig. 8 Output Spectra from Er-doped Fiber Amplifiers for Different Kinds of Host Glass: (a) Fluoride Glass; (b) Silica Glass(10)

km伝送した報告もなされている<sup>(10)</sup>。

フッ化物光ファイバを用いた 1.3  $\mu\text{m}$ 帯及び 1.55  $\mu\text{m}$ 帯光増幅器については早期の実用化が大いに期待されるが、その際にはフッ化物光ファイバの耐候性の低さをいかに克服するかも重要な課題であり、今後この分野でも研究が進展することが望まれる。

### 3-2. 光ファイバレーザへの応用

近年、光ファイバ増幅器と並んで希土類元素をコアに添加したフッ化物光ファイバを用いた光ファイバレーザの研究も盛んである。これまで、Nd、Er、Tm、Pr、Ho、などを添加することによって種々の波長でのレーザー発振が観測されている。その中で特にアップコンバージョン過程を利用した短波長レーザーが、光ディスクの記録密度向上を実現するデバイスとして注目されており、Fig. 9 に示すようにPrをコアに添加したフッ化物光ファイバを用いて室温での青色(492nm)レーザの発振にもスロープ効率13%で成功している<sup>(11)</sup>。今後の研究の進展による、新たな波長での発振の実現に大いに期待したい。

## 4. フッ化物光ファイバによるファイバグレーティングの作製

石英ガラス光ファイバに紫外光を照射することによって屈折率変化が誘起されることが知られているが、この現象を用いて光ファイバ中にグレーティングを形成して光フィルタや、ファ

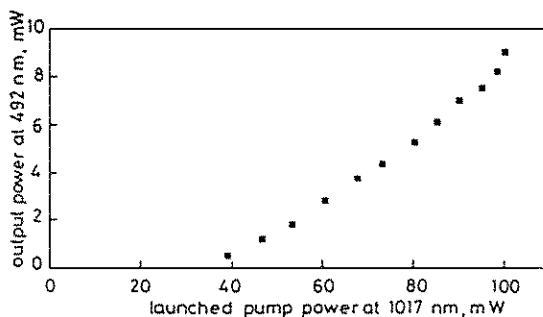


Fig. 9 Experimental Performance for 492nm Blue Laser(11)

イバレーザのキャビティに利用しようとする研究が盛んである。最近Ceをコアに添加したZBLAN系フッ化物光ファイバでも、244nmの紫外光を照射することによって屈折率変化が誘起されることが確認された<sup>(12)</sup>。Fig. 10にはファイバグレーティング生成過程に於ける、紫外光の照射時間に対する規格化反射率の変化を示している。紫外光照射の中止と共に若干の回復が認められるものの、その後は数日経過後も安定とのことである。更にFig. 11に作製された長さ10.3nmのファイバグレーティングの透過スペクトルを示しているが、このスペクトルにおける反射率、反射波長、更にフッ化物光ファイバの構造から、誘起屈折率変化は $2 \times 10^{-5}$ 程度と見積もられる。今後この屈折率変化のメカニズム解明とともに、フッ化物光ファイバの新たな応用の道として注目される。

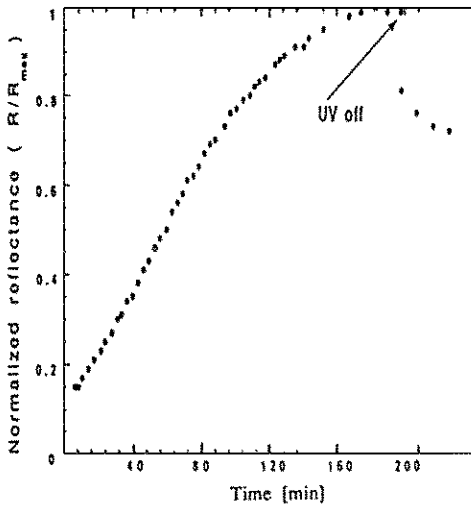


Fig. 10 Evolution of Reflectance of a Grating as a Function of UV Irradiating Time(12)

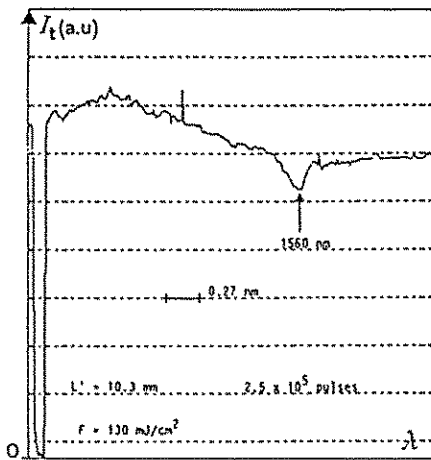


Fig. 11 Transmission Spectrum of a Grating Written by  $2.5 \times 10^5$  Pulses at  $130 \text{ mJ/cm}^2$  in a ZBLAN Fiber(12)

## 5. おわりに

フッ化物光ファイバについて、最近のトピックスを中心に述べさせて頂いた。実際のところフッ化物光ファイバの極低損失化の追求については小休止の状態となっていることは否めないが、光増幅器やファイバレーザーなどの研究を通じて種々の知見を蓄積し、いつの日か再び低損失化競争が活発化することを切に願う次第である。またフッ化物ガラスの特徴を活かした新

しいアプリケーションにも期待していきたい。

## 参考文献

- (1) T. Kanamori and S. Sakaguchi: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 25, No. 6, L468(1986).
- (2) S. F. Carter, M. W. Moore, D. Szabesta, J. R. Williams, D. Ranson and P. W. France: Electron. Lett., Vol. 26, No. 25, pp2115(1990).
- (3) K. Fujiura, Y. Nishida, H. Sato, S. Sugawara, K. Kobayashi, Y. Terunuma and S. Takahashi: 8th Int. Halide Glasses Symp., TuA4(1992).
- (4) T. Sugawa, Y. Miyajima and T. Komukai: Electron. Lett., Vol. 24, pp2042(1990).
- (5) Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Kitagawa, S. Takahashi, E. Snitzer and G. H. Sigel, Jr.: Optics Letters Vol. 16, No. 22, pp1747(1991).
- (6) M. Shimizu, M. Yamada, T. Kanamori, Y. Ohishi, Y. Terunuma, S. Sudo, H. Yoshinaga and Y. Miyamoto: OFC' 95, Tech. Digest, WD5(1995).
- (7) K. Nakazato, M. Nishimura, C. Fukuda and M. Onishi: OAA' 93, Tech. Digest, PD9 (1993).
- (8) D. W. Hewak et al.,: Electron. Lett. Vol. 29, No. 2, pp237(1993).
- (9) Y. Nishida, Y. Ohishi, T. Kanamori, Y. Terunuma, K. Kobayashi and S. Sudo: ECOC' 93, TuC3.1(1993).
- (10) B. Clesca, D. Bayart and J. L. Beylat: Optical Fiber Technology, Vol. 1, pp135(1995).
- (11) Y. Zhao and S. Poole: Electron. Lett. Vol. 30, No. 12, pp967(1994).
- (12) T. Taunay, P. Niay, P. Bernage, X. Xie, H. Poignant, S. Boj, E. Delevaque and M. Monerie: Optics Letters, Vol. 19, No. 17, pp1269(1994).