単一モード光ファイバ用フッ化物 ガラス母材の作製技術

金 森 照 寿¹⁾ 照 沼 幸 雄²⁾

2.5 μm 帯光伝送用ファイバ作製および波長 1.3 μm 帯光増幅用ファイバ作製への適用について述べる。

1. はじめに

フッ化物光ファイバは、0.3~3.5 μm の波長域において石英光ファイバより低い固有伝送損失を有し、その最小値は波長 2.55 μm で石英系の最小値の1/10以下に低下すると推定されている。このため、フッ化物ファイバは次世代光伝送媒体の最有力候補に挙げられており、その固有損失実現を目指してガラス系の探索やファイバ化技術の開発が進められている。これまでに、熱安定性の高いガラスとして ZrF_4 , BaF_2 , NaF を主成分とする系⁽¹⁾が見いだされているが、そのガラス化には急冷が不可欠である。このような急冷を要するフッ化物ガラスをファイバに加工する手法として、Rotational Casting⁽²⁾, Suction Casting⁽³⁾等の熔融キャスト法を用いたガラス母材作製法が開発されてきた。その結果、現在 1 dB/km 程度の損失値が多モードファイバ(長さ~100 m)で得られるにいたっている。

フッ化物光ファイバの媒体特性を最大限に活かすにはファイバを単一モード化する必要がある。単一モードファイバの作製には二重のつぼ線引き法⁽⁴⁾やジャケット線引き法⁽⁵⁾が検討されてきた。二重のつぼ線引き法では、ガラス化に必要な冷却速度が得られるように改良されて、500 m 程度のファイバが作製されているが、伝送損失が報告されるにはいたっていない。ジャケット線引き法はジャケットガラス管にガラス母材を挿入して一体化して線引き、単一モード化に必要なコア径を実現する方法である。この手法では数 dB/km の損失値が得られているが、それらが実現されているファイバは短く(<30 m)、長尺でかつ低損失なものは作製されていない。この手法で長尺ファイバを得るにはコア/クラッド径比の小さい大型の母材を作製するか、あるいは母材コアの均一細径化を図る必要がある。

著者らは、長尺・低損失なフッ化物単一モードファイバの作製を目的として、ジャケット線引き用の母材作製に延伸法を適用する技術⁽⁶⁾を初めて開発した。以下、単一モードファイバ用フッ化物ガラス母材の作製技術とその波長

2. ジャケット線引き用母材開発の方策

フッ化物ガラスは、石英ガラスに比べ結晶化に対する熱安定性が低いため、製造には大きな制約がある。熔融キャスト法によってガラスロッドを作製する場合、冷却速度によって外径の大きさが制限される。現時点では 15 mm を越えると微結晶が析出し易くなる。ガラスが再加熱される場合、ガラス転移温度から~100°C上では急速に結晶化する。なお再加熱過程では一般に表面結晶化が内部のバルク結晶化に先行する傾向がある。

ジャケット線引き用の母材は熔融キャスト法によって直接作製することが最善である。しかし、これまで開発されたこの種の手法では長尺・単一モード化の可能な母材は得られない。例えば、Rotational Casting は予熱したモールドにクラッドガラス融液を注入し、モールドを水平にして高速回転させながら融液を固化させ、生じた中空部にコア融液を注入する方法である。この方法では一定のコア/クラッド径比が得られるが、上述したように外径の大きさが制限され、コアの細径化も難しい。このため径比を小さくできない。Suction Casting は予加熱したモールドの上部開口部からクラッド融液を注入し、続けてコア融液をクラッド融液の上に注ぎ込む方法である。この際、クラッド融液の固化による体積収縮によってコア融液は下方へ吸い込まれ、コアが形成される。この方法では部分的には細径コアが得られ、コア/クラッド径比も小さくなるが一定にはならない。また、コアガラスをジャケット用ガラス管に挿入して一体化する方法もあるが、この手法では欠陥のない良質なコア・クラッド界面を形成することが難しい。

そこで、熔融キャスト法母材をジャケットガラス管に挿入して一体化して延伸する方法(ジャケット延伸)を採用し、コアの均一細径化を図った。フッ化物ガラスでは、延伸工程を付加することにより結晶化が一層進行すると考えられていたが、次の方策で結晶化を抑制した。(1)界面や内部の欠陥が少なく、コア径の小さい母材を使用する。Suction Casting では界面が同時に形成され、かつ冷却速度も高く取れるので、得られる母材はこの条件に合うが、コアはテーバー状になって一定にならない。このため、母材コアのテーバーをストレートに修正して、同時に細径化

* NTT 光エレクトロニクス研究所光材料部

1) 主幹研究員 2) 主任研究員

Fabrication of Fluoride Glass Preforms for Single-Mode Optical Fibers; Terutoshi Kanamori, Yukio Terunuma (NTT Corporation)

1992年1月31日受理

する方法(テーパ延伸法)を開発する。(2)ジャケット管にも内壁や内部の欠陥の少ないガラス管を用いる。これは Rotational Casting によって作製する。(3)延伸は、再加熱で先行する表面結晶化に注目し、これを抑制する条件を見いだすことで最適化する。

3. テーパ延伸法

テーパ状のコアを以下に述べるように延伸して所定の径の均一コアに加工した。コア径 D が次の式で表されるテーパ形状を有する時、

$$D = \alpha z + \beta \quad (1)$$

母材をコア先端($z=0$)部の方向へ V_0 の速度で送り、コア径が D_0 になる位置を起点(時間 $t=0$)に次に示す速度 V で引き取ると、 D_0 の径の均一コアが得られる。

$$V = V_0(\alpha V_0 t / D_0 + 1)^2 \quad (2)$$

内径 7 mm のモールドで作製した Suction Casting 母材は円錐に近い形状のコアプロファイルを示し、その径は $z=12\sim 58$ mm で次のように近似できた。

$$D = 0.041z + 1.1 \text{ (mm)} \quad (3)$$

この母材をテーパ延伸すれば >1.6 mm のコア径が得られる。それ以下に細径化するには、ストレートにジャケット延伸する工程を付加する必要がある。図 1 に作製したファイバのコア径変動を示す。コア径は均一で、 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以内に入っていることがわかる。

4. 表面結晶化の抑制

フッ化物ガラスの表面結晶化は塵や水などの汚染や傷等が付随的な核になって加速される。このため、これらの欠陥を徹底的に除去し、かつ低温・短時間で延伸できる条件を探索することによりその抑制を図った。ガラス母材は研磨紙を用いて一定の外径に研磨した後、 ZrOCl_2 の塩酸溶液を用いてエッチングし、傷等の欠陥を除去した。ジャケット管はクリーンでドライな不活性ガス雰囲気で作製し、

図 1 ファイバのコア径変動⁽⁷⁾。

図 2 ファイバの線径ゆらぎ(ファイバ線径: $125 \mu\text{m}$)。

図 3 ファイバの断面写真⁽⁷⁾。

さらに同様な雰囲気中で母材を内部に挿入することにより、管内壁の汚染を防止した。延伸はジャケット管内を減圧し、不活性ガス雰囲気中でゾーン加熱して行った。延伸時に結晶化が生じると、これは線引きの際のファイバ線径のゆらぎや形成された界面の不整となってあらわれる。図 2 に線引き時の線径モニターのトレースを示す。ファイバ外径のゆらぎ(線径ゆらぎ)が $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内に入ることから、ミクロンオーダーの結晶は生じていないことがわかる。ファイバの断面写真を図 3 に示す。ジャケットニングによって形成された界面は良く整合しており、不整は見られない。

5. $2.5 \mu\text{m}$ 帯光伝送用単一モードファイバ

最小損失が予想されている波長 $2.55 \mu\text{m}$ で単一モード化するには、コアとクラッド間の比屈折率差 Δn を 0.3% に設定し、かつ線引きに 15 mm 径のジャケット管を使用する場合、母材のコア径を 1.8 mm に設計する必要がある。これは 1 回のテーパ延伸で達成できる⁽⁷⁾。作製したファイバの伝送損失スペクトルを図 4 に示す。波長 $2.15 \mu\text{m}$ のピークは LP_{11} モードの遮断に起因しており、 $2.35 \mu\text{m}$ より長波長で単一モード領域に入ることがわかる。

図4 伝送損失スペクトル(コア径: 14.5 μm , 外径: 125 μm , Δn : 0.3%, ファイバ長: 324 m).

2.35 μm での損失値は 5.5 dB/km である。この伝送損失は多モードファイバで報告されている最小値より大きい。同一長さのものと比較すると低損失である。本技術で作製されたファイバを用いて波長 2.55 μm での伝送実験が試みられ、2.1 km スパンのコヒーレント伝送実験が達成されている⁽⁸⁾。

6. 1.3 μm 帯光増幅用単一モードファイバ

Pr をコアに添加したフッ化物光ファイバは既存の通信波長である 1.3 μm 帯用光増幅媒体として非常に注目されている。増幅効率を高めるには信号光と励起光をともにコア内に閉じ込めることが必要で、これには高 Δn ・単一モード化を実現しなければならない。15 mm 径のジャケット管を使用した場合、波長 1.0 μm で単一モード化するには、母材コア径は Δn を 0.6% と設定すると 0.5 mm, 3.7% では 0.2 mm に設計する必要がある。これらはストレート延伸を 2 回加えることで実現できる。図 5 は Pr ドープファイバの増幅スペクトルである⁽⁹⁾。波長 1.31 μm で 32.6 dB の利得が得られている。さらに、 $\Delta n=3.7\%$ のファイバでは利得係数 0.2 dB/mW が達成され、レーザーダイオードによる光増幅の可能性が確認された⁽¹⁰⁾。

7. あ と が き

本技術はフッ化物ガラスでは困難とされていた延伸法を初めて実用的な水準まで向上させたものであり、フッ化物

図5 光増幅スペクトル(Pr: 500 ppm, コア径: 3.3 μm , 外径: 125 μm , Δn : 0.6%, ファイバ長: 23 m, 励起光強度(波長 1.017 μm): 925 mW)⁽⁹⁾。

単一モードファイバの長尺化を可能にし、伝送損失値も多モードファイバと遜色のないレベルまで低下させた。これによって 1.3 μm 帯光増幅の開発が進展した。超低損失の実現には課題が残っているが、フッ化物ガラスで延伸法が適用できることを示したことにより、今後の低損失化研究での新たな手段を提供したといえる。

文 献

- (1) 特許: 特願昭61-119049.
- (2) D. C. Tran, C. F. Fisher and G. H. Sigel, Jr.: Electron. Lett., **18**(1982), 657.
- (3) Y. Ohishi, S. Sakaguchi and S. Takahashi: Electron. Lett., **22**(1986), 1034.
- (4) H. Tokiwa, Y. Mimura, T. Nakai and O. Shinbori: Electron. Lett., **21**(1985), 1131.
- (5) Y. Ohishi, S. Mitachi and S. Takahashi: IEEE J. Lightwave Technol., **LT-2**(1984), 593.
- (6) 特許: 特願平 2-134018.
- (7) 金森照寿, 照沼幸雄, 藤浦和夫, 及川喜良, 高橋志郎: NTT R & D, **39**(1990), 1353.
- (8) T. Komukai, Y. Miyajima, T. Kanamori and Y. Terunuma: Proc. IOOC-ECOC'91, Paris, (1991), 697.
- (9) Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Nishi and S. Takahashi: IEEE Photon. Technol. Lett., **3**(1991), 715.
- (10) Y. Ohishi, T. Kanamori, J. Temmyo, M. Wada, M. Yamada, M. Shimizu, K. Yoshino, J. Hanafusa, M. Horiguchi and S. Takahashi: Electron. Lett., **27**(1991), 1995.