フォトニック結晶ファイバの製作技術

遠山 修, 伊藤 秀明, 山口 俊一郎

三菱電線工業(株) (〒660-0856兵庫県尼崎市東向島西之町8)

Manufacturing Technology for Photonic Crystal Fibers

Osamu TOHYAMA, Hideaki ITOH, and Syun-ichiro YAMAGUCHI

Mitsubishi Cable Industries, Ltd., 8, Nishino-cho, Higashimukoujima, Amagasaki, Hyogo 660-0856

(Received August 1, 2005)

Dramatic advances in research and development on photonic crystal fibers have created new properties that have not been achievable using conventional fibers. Photonic crystal fibers have many fascinating features. The very high relative refractive index between the fiber core and air hole cladding enables several prominent properties, notably endlessly single-mode operation, high nonlinearity, wide-ranging dispersion management, and the ability to maintain high polarization. The processes involved in manufacturing photonic crystal fibers are quite different from those used to manufacture conventional fibers, largely due to the profusion of air holes in the silica glass that comprises photonic crystal fibers. Our research group has optimized the technology to manufacture photonic crystals with the required optical characteristics. This paper describes the manufacturing technology we have developed to produce photonic crystal fibers with low attenuation and high reliability.

Key Words: Photonic crystal fiber, Preform, Stack and draw method, Low attenuation, High reliability

1. はじめに

フォトニック結晶ファイバ(Photonic Crystal Fiber: PCF)はファイバ断面内に屈折率が周期的に変化する構造を持つファイバである。そのほとんどが屈折率が約1.45の純粋石英に屈折率1の空気を含むエアホールがファイバ断面内に周期的に配列し、そのエアホールはファイバ軸方向に沿って伸びている。フォトニック結晶ファイバは、そのコアと空孔を含むクラッドにより得られる非常に大きい比屈折率差により、超広帯域シングルモード動作¹⁾、高非線形²⁾、分散制御³⁾、偏波保持⁴⁾、低曲げ損失性⁵⁾等の独特の特性を得ることができる。一方、多数の微細なエアホールを有する断面構造を実現するためには、従来の光ファイバとは全く違った新規の製作技術の開発が必要となる。特に前記特性を実現するために設計されたエアホール径とエアホール間のピッチを再現性よく製作するためには、特殊な母材の構成の実現や線引方法を開発する必要がある。

本稿では、各種構造・用途に適したフォトニック結晶ファイバの母材作製及び線引技術を述べるとともに、実用化に向けての重要課題である損失低減のための対策及び信頼性確保に関して、いくつかの試験結果をあわせて報告する。

2. 構造

フォトニック結晶ファイバの断面構造図を、Fig. 1に示す。Fig. 1 (a)は、コアと空孔を有するクラッド部分との屈折率差により光を閉じ込めて伝搬させる屈折率導波型であり、多くの独特な特性が実現可能な一般的なタイプである。Fig. 1 (b)は、屈折率導波型の一種で、大きなエアホール径で少数のエアホールからなるエアクラッド型である。これは、Fig. 1 (a)を簡略化させたもので、極限られた特性が必要な場合に用いられる。Fig. 1 (c)は、通常の光ファイバと同じくGeなどの不純物をドーピングしてコ

Fig. 1 Structure of photonic crystal fibers.

アで実現したうえで、コアの周りにホールをいくつか設けたホールアシスト型であり、特に曲げ損失特性改善の目的で用いられることが多い。Fig. 1 (d)は、中空コアを有するフォトニックバンドギャップ型で、光は中空部分を伝搬するので、従来の石英ファイバでは伝搬できなかった短波長(紫外)伝送やハイパワー伝送が期待されている。

3. 製造方法

3.1 Stack and Draw法(Capillary法)

Stack and Draw法とは、クラッド領域のエアホールを構成するキャピラリ(石英細管)を所望のサイズに線引きし、これを多数積み重ね(Stack)でサポート管に挿入し、さらに中心にあるキャピラリをコア材料(例えば純粋石英)に置換してプリフォームとし、これを線引(Draw)する方法である。また中空のパイプでエアホールクラッドの出発材を組み立てることから、キャピラリ法とも呼ばれている。作製プロセスをFig. 2に示す。出発材料のサイズに自由度が大きく、ホール数の多いPCFも比較的容易に作製できるため、汎用性のある方法である。例えば、コア直径、キャピラリの外径・肉厚及びサポート管の外径・肉厚を変化させるだけで、各種特性を有するフォトニック結晶ファイバを作製することが可能である。Fig. 1 (a), (c)は本方法で作製されることが多い。但し、エアホール数が非常に多いタイプのフォトニック結晶ファイバを作製する場合、サポート管の内径・形状、キャピラリの外径の寸法公差を厳密に管理しないと、コアの偏心が発生する可能性がある。

3.2 ドリル法

ドリル法とは、円筒純粋石英ガラスロッド、もしくは中心部分にGe等の不純物添加によるコア領域を有するロッドに、ドリルでエアホールに相当する穴を空けてプリフォームとし、これを線引する方法である。プリフォームの形状をFig. 3に示す。この方法はStack and Draw法のような偏心の可能性はほとんどないが、石英ガラスという脆性材料に精度良く多数のエアホールをドリルで穿孔することが難しいため、比較的エアホール数の少ないフォトニック結晶ファイバ(例えばFig. 1 (b), (c))の作製に適している。また同様の理由で母材の大型化も難しいため、長尺線引きによるコストダウンが期待できない

Fig. 2 Stack and draw method.

Fig. 3 Drilling method.

方法である。

3.3 線 引

前記方法にて得られた母材は、従来と同様の線引機により外径125 μm 程度のファイバに加工される。Stack and Draw 法により得られた母材の線引きには、熔融一体線引法⁶⁾が用いられる。これはイメージガイドファイバ⁷⁾の線引きのために開発された方法で、サポート管に詰め込まれた数千から数万本の画素ファイバ間の隙間を減圧状態にしながらか融一体化するものである。但しフォトニック結晶ファイバの場合は詰め込まれているのがキャピラリであり、キャピラリ間の隙間を減圧状態にした場合、得られたファイバのエアホールの形状が変形してしまう。そこでキャピラリ間の隙間を減圧しつつ、キャピラリ内を加圧するという方法が必要である。このため母材に圧力コントローラを装着して、キャピラリ間、キャピラリ内の圧力を精密に制御しながら線引きする方法をとっている。ドリル法によって得られた母材も、同様の方法でエアホール内の圧力が制御されている。線引装置の概略図をFig. 4に示す。

4. 構造設計

4.1 偏波保持型

フォトニック結晶ファイバは、エアホールの直径(d)、エアホール間隔(Λ)を適宜選択することにより、各種特性を得ることができる。例えば、偏波保持特性を得るためには、ファイバ断面の直交軸のNA (Numerical Aperture: 開口数)に異方性を与えれば良いので、Fig. 5に示すようにコアロッド最近傍のキャピラリ2本の内径を大きくするだけでよい。応力付与ロッド2本をコアの両側に象嵌する従来法に比べ、非常に簡便に母材を作製することが出来る。このようにして作製された偏波保持型フォトニック結晶ファイバの断面写真をFig. 6に示す。

4.2 分散制御

フォトニック結晶ファイバの分散もエアホールの直径(d)、エアホール間隔(Λ)により、容易に設計することが出来る。具体的には純石英の材料分散を基本として、 d/Λ を調整し、構造分散を重量させることにより様々な分散特性が得られる。エアホール径とエアホール間隔を変化

Fig. 4 Drawing of preform.

Fig. 5 Array of capillaries and rod for polarization maintaining.

させたときのフォトニック結晶ファイバの分散をFig. 7に示す。エアホール径やエアホール間隔が小さくなるにつれて、零分散波長が短波長側にシフトしていることが分かる。さらにコア領域への不純物添加によっても分散の調整が可能であり、これらのパラメータを適当に設定することにより短波長零分散、通信帯での高異常分散、任意の波長での分散フラット等の分散特性が実現される。

5. 低損失化

通常の光ファイバの損失要因は、ガラス中の不純物吸収(特にOH吸収)、構造不整およびレイリー散乱である。フォトニック結晶ファイバも同様の損失要因に支配される。したがって、全損失を要因別に分解して表すと、通常の光ファイバと同様に、

$$\alpha(\lambda) = A\lambda^{-4} + B + \alpha_{\text{OH}}(\lambda) \quad (1)$$

と表すことが出来る⁸⁾。

レイリー散乱係数 A には石英ガラスの密度揺らぎの他、エアホール表面の微細な凹凸も影響していると推定される。構造不整損失 B は、エアホールの寸法変動やエアホール表面の微細な凹凸が原因であると考えられる。OH吸収損失はコア及びエアホール表面に残留している水分が原

Fig. 6 Cross sectional view of polarization maintaining type photonic crystal fiber.

Fig. 7 Dispersion of photonic crystal fiber with various pitch.

因と考えられる。また、エアホール中に存在する水分子の影響もあると考えられる。いずれにしろ、エアホール表面の影響が大きく、この影響をいかにして小さくするかがフォトニック結晶ファイバの低損失化の課題である。波長と損失の関係を、横軸を $1/\lambda^4$ としてプロットしたものをFig. 8に示す。

具体的な低損失化の方策として、キャピラリをスタックして作製した母材の脱水処理、線引温度・速度の最適化によるキャピラリ内面の平滑化、断面空孔配置の高精度化等を検討した。母材作製工程中に脱水処理を施したフォトニック結晶ファイバの損失特性の一例をFig. 9に示す。このフォトニック結晶ファイバの構造パラメータは $\Lambda = 7.3 \mu\text{m}$, $d = 4.2 \mu\text{m}$ であるが、損失は、 $0.35 \text{ dB/km}@1.55 \mu\text{m}$ と 0.5 dB/km 以下を達成している。また、レイリー散乱係数 $A = 1.02 \text{ dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$, 構造不整損失 $B = 0.25 \text{ dB/km}$ と、通常の光ファイバの値にかなり近づいていることがわかる。

6. 信頼性の確保

フォトニック結晶ファイバは、その端面を解放状態にした場合、水分を含んだ空気がエアホール内に滲入し、ファイバ端面が汚染されたり、伝送損失に温度依存性があることは既に報告されている⁹⁾。そこで実用上、フォトニック結晶ファイバには真空乾燥処理を行ない、乾燥ガスによりエアホール内を置換した上で、両端を何らかの手段により封止し、外部とエアホールとの相互作用を遮断する必要がある¹⁰⁾。信頼性確保のための封止方法の検討結果を以下に述べる。

Fig. 8 $1/\lambda^2$ plot.

6.1 ファイバ接続

フォトニック結晶ファイバを実際に応用する場合、ピグテールファイバを接続することが好ましい。これにより他のデバイス(例えば光源、検出器等)との接続が容易となる。このピグテールファイバ接続には、フォトニック結晶ファイバの端面封止の役割も担わせることができる。そこでフォトニック結晶ファイバと通常のファイバとの接続を検討した。

まず、接続時の損失を低減するためには、フォトニック結晶ファイバとほぼ同一のモードフィールド径(Mode Field Diameter: MFD)の光ファイバを接続する必要がある。そこで、最も接続が難しいと考えられるコア径の小さい高非線形フォトニック結晶ファイバとモードフィールド径の小さい分散補償ファイバ(Dispersion Compensating Fiber: DCF, 今回使用したのはコア径: $2.01\text{ }\mu\text{m}$, Δ : 1.89%, モードフィールド径: $4.7\text{ }\mu\text{m}@1.55\text{ }\mu\text{m}$)との融着接続を検討した。

フォトニック結晶ファイバと通常のファイバとを融着接続する場合の模式図をFig. 10に示す。融着接続機のアーク放電によりファイバの先端が溶融し、フォトニック結晶ファイバのエアホールが潰れて、Fig. 10のように接続されていると考えられる。この場合、コアが純粋石英であるため、溶融した部分は導波構造を持たない単なる石英棒になってしまう。このためフォトニック結晶ファイバ中を導波してきた光は、融着接続部で大量に漏れてしまい接続損失が非常に大きいものになってしまう。そこでこの溶融領域の長さ(溶融長)を極限まで短くして融着する必要がある。よってアーク放電強度、時間、融着時の押し込み応力等のパラメータを最適化して、融着接続の低損失化を図った。融着接続には放電強度、放電時間等の

Fig. 9 Loss spectrum.

接続条件及び調芯等が設定可能な、市販の融着接続機を使用した。実際の接続は入射光の透過パワーをパワーメータでモニタしながら、損失が最低になるように放電時間等の接続条件を調整して行った。

フォトニック結晶ファイバのコア径に対する接続損失をTable 1に示す。表から明らかなように、フォトニック結晶ファイバのコア径と接続したDCFのモードフィールド径の不一致により、接続損失が大きくなっている。また融着によりフォトニック結晶ファイバのエアホール構造が潰れることも、接続損失の増加の原因と考えられる。

よって出来る限りモードフィールド径に近いファイバもしくは、どうしてもモードフィールド径の差が大きいものについては、中間のモードフィールド径をもつバッファファイバを挿入して融着接続する必要がある。このようにして融着接続した結果をFig. 11に示す。モードフィールド径を合わせることで、フォトニック結晶ファイバと通常のシングルモードファイバを約0.3 dBの低損失で接続することが可能である。

6.2 コネクタ装着

実際のフォトニック結晶ファイバの応用を考えると、さらにコネクタ装着が必須である。但しフォトニック結晶ファイバの場合は端面に多数の空孔が存在するため、従来のようにフェルールをつけて研磨すると、空孔から研磨時の水・研磨粉を吸い上げる、研磨粉により空孔が

Fig. 10 Schematic diagram of connecting point.

Table 1 Connection loss between PCF and DCF.

Core diameter of PCF (μm)	Connection loss between PCF and DCF (dB)
1.7	6.57
2.0	3.99
2.6	2.32

Fig. 11 Comparison of connection loss.

崩れる等の問題があり、そのまま研磨をしてコネクタを装着することが出来ない。これらの影響を無くして端面を研磨してコネクタ装着するには、フォトニック結晶ファイバ端面を何らかの方法によって閉塞させる必要がある。

閉塞材料には硬化時にファイバ(石英)と同一の硬度(研磨をしても封入部分が隆起・陥没しない)、エアホールと同一の光学特性(屈折率=1)を持つものが必要となる。特に硬度については、接続時に回転方向に力が発生するFCコネクタについては、特に重要である。現在市販の樹脂で前記特性を満足するものは無く、独自に閉塞用の樹脂を開発した。

次に問題となるのは閉塞充填長をどのように制御するかである。先の融着接続と同様で、充填領域は単なる石英棒と同様の役割を果たす。よって充填領域を十分に短く制御しないと、この部分から導波してきた光が漏れ、コネクタ接続時の損失が著しく大きくなる。このため、樹脂の粘性を調整してある程度の充填長の制御が可能な状態で閉塞し、最終的には研磨によって精密に充填長を定める方式で端面処理を実施した。ファイバ先端部の模式図をFig. 12に示す。

この方法によってコネクタ装着をしたフォトニック結晶ファイバ(短波長シングルモード型, MFD: $10\mu\text{m}$, 純粋石英コア)と通常のシングルモードファイバをコネクタにより接続し、シングルモードファイバから通信用LD(波長: 1550nm)の光を入射した場合のコネクタ接続損失を評価した。実験の構成をFig. 13に示す。この場合の接続損失は約0.1 dBであり、シングルモードファイバ同士との接続と遜色の無い結果が得られた。

7. まとめ

特殊な構造を持つフォトニック結晶ファイバに適した、従来とは異なる新たな母材作製・線引方法について述べた。現在では母材の大型化・線引技術の改善により、従来のシングルモードファイバと同様に、長尺での線引きが可能となっている。また実用化に向けての重要な課題である損失低減のための対策も検討し、脱水処理等の方法により低損失化が可能となった。さらに信頼性確保のためのファイバ端面封止についても、ファイバ・コネクタ接続を検討し、空気・水・コンタミネーション等の侵入による特性の劣化を抑えることができた。

フォトニック結晶ファイバは既に広範な波長域(紫外、

Fig. 12 Schematic diagram of a tip of PCF.

Fig. 13 Connection loss.

可視、赤外)で実用が開始されており、さらなる品質の向上が今後の課題である。

謝 辞

日頃ご指導頂いておりますNTT未来ねっと研究所の萩本所長、山林部長、並びに川西リーダはじめ同所の研究員の皆様に感謝いたします。本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費による開発課題「ブロードバンド光シンセサイザの開発」において得られたものです。

参考文献

- 1) T. A. Birks, J. C. Knight, and P. St. J. Russell: Opt. Lett. **22** (1997) 961.
- 2) 木下 貴陽, 田中 正俊, 伊藤 秀明, 遠山 修, 藤田 盛行: 電子情報通信学会総合大会 (2005) CS-12-10.
- 3) T.-L. Wu and C.-H. Chao: IEEE Photon. Tech. Lett. **17** (2005) 67.
- 4) Y. Inoue, T. Aiba, and N. Shibata: IEEE Photon. Tech. Lett. **17** (2005) 1238.
- 5) K. Miyake, M. Hachiwaka, T. Kinoshita, S. Yamaguchi, H. Kubota, and S. Kawanishi: Proc. 30th European Conference on Optical Communication (2004) Mo3. 3.4.
- 6) 内海 厚: レーザー研究 **12** (1984) 677.
- 7) 速水 弘之, 大瀬 智六, 蟬本 慶三, 石谷 忠義, 内海 厚: 大日本電線時報 No. 71 (1986) 74.
- 8) 大越 孝敬, 岡本 勝就, 保立 和夫: 光ファイバ (オーム社, 1983)p. 315.
- 9) 田中 正俊, 山取 真也, 藤田 盛行, 鈴木 和宣, 久保田 寛和, 川西 悟基: 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (2002) C-3-47.
- 10) O. Tohyama, M. Tanaka, T. Kinoshita, S. Yamaguchi, H. Kubota, and S. Kawanishi: Proc. 29th European Conference on Optical Communication (2003) We2. 7.2.

レーザーワード

スタック・アンド・ドロー法 (stack and draw method)

フォトニック結晶ファイバの線引方法のひとつで、クラッド領域のエアホールを構成するキャピラリ(石英細管)を所望のサイズに線引きし、これを多数積み重ねてサポート管に挿入し、さらに中心にあるキャピラリをコア材料(例えば純粋石英)に置換してプリフォームとし、これを線引する方法である。この方法は特に新規なものではなく、何万本もの画素ファイバを束ねてサポート管に挿

入し、これを溶融一括線引きするイメージガイドファイバの製法として、従来から使用されている方法である。但しフォトニック結晶ファイバの場合は、エアホール径とエアホール間のピッチを正確に制御するため、キャピラリ間の空間を減圧し、キャピラリ内を加圧した状態でバランスを取りながら線引きするので、特殊な圧力制御が必要となる。(遠山 修)