レーザー解説

VAD光ファイバ

枝 広 隆 夫

(1981年10月8日 受理)

VAD Optical Fibers

Takao EDAHIRO

(Received Oct 8, 1981)

1. はじめに

石英系ガラス光ファイバの研究は1966年英国STLのKaoとHockhamによる先駆的な提案¹⁾に始まり、1970年米国Corning社のKapron²⁾等による20dB/kmという当時としては低損失光ファイバの実現²⁾に至って、世界的に急速な盛り上がりを見た。光ファイバ製造技術の中で、米国Bell研究所のMacChesney等が開発したMCVD法(Modified Chemical Vapor Deposition)³⁾は1974~1979年における光ファイバ特性向上の中心的役割を演じた。すなわち、1974年に1.1dB/km($\lambda=1.06\mu\text{m}$)⁴⁾、1976年に0.47dB/km($\lambda=1.18\mu\text{m}$)⁵⁾そして1979年には石英系光ファイバの極限値にせまる0.2dB/km($\lambda=1.55\mu\text{m}$)⁶⁾など最低損失を年毎に引下げる原動力になった。1976年に実現した0.47dB/kmはそれまで低損失の窓と考えられていた0.85 μm 帯、1.06 μm 帯よりも長い波長帯に真の低損失の窓があることを実証し、また1979年に達成した0.2dB/kmの極低損失光ファイバの実現は石英系光ファイバの理論的損失限界値が1.55 μm に在ることを実証するなど、関連する光部品や光伝送方式の開発に大きなインパクトを与え、1.3 μm 用および1.55

μm 用光伝送方式⁷⁾の進展を促した。

光ファイバが大量に利用されると予測される近い将来に向け、量産性の高い光ファイバ製造技術への要請がOVPO法(Outside Vapor Phase Oxidation)⁸⁾、やVAD法(Vapor-phase Axial Deposition)⁹⁾を生み出すきっかけとなった。本文は特にVAD法による光ファイバ製造技術の概要と光ファイバの伝送特性に的を絞って解説し、今後の方向についても述べる。

2. VAD法の概要

2.1 装置

VAD法は図1に示すような装置により、光ファイバ母材を連続的に合成するものである。多孔質母材を合成する工程と多孔質母材の透明化工程からなる。第一の工程では SiCl_4 、 GeCl_4 や POCl_3 などのガラス形成原料を気相状態で輸送し、酸水素火炎内で加水分解反応によりガラス微粒子として石英ガラス棒端面に堆積させる。第二の工程では多孔質母材を反応部上方に設置した電気炉でゾーンメルトして透明な母材とする。この第一の工程と第二の工程を軸線にそって連続化できるため、連続して長尺な母材を作製できる利点を有している。

日本電信電話公社茨城電気通信研究所 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村)
Ibaraki Electrical Communication Laboratory, Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation
Tokai, Ibaraki 319-11 Japan

Fig.1..Apparatus for optical fiber preform fabrication by VAD method.

ITVカメラやレーザー光により多孔質母材先端位置をモニタし引上げ速度にフィードバックするため、多孔質母材先端は常に一定に保たれるとともに、ガラス微粒子堆積条件も一定に保たれる。この結果、多孔質母材の外径寸法は0.5%以内の変動に抑えられ、屈折率分布など軸方向に安定に形成できる。

原料供給量、排気量、火炎温度、母材の回転速度などの製造パラメータの安定化が、寸法や屈折率分布など長手方向に均質な母材を得るキーポイントになる。パラメータの変動は母材の特性変動の原因になり製造歩留りを劣化させる。図1に示すITVカメラや温度計によって、多孔質母材の先端面形状や温度分布を計測しパラメータ変動を抑える。

多孔質母材の透明化において温度や雰囲気ガスの条件が、残留気泡のない母材を得る重要な条件になり、電気炉構造の設計や条件の設定に大きなウエイトが掛る¹⁰⁾。透明化工程途中の母材を図2に示すように、多孔質母材は急激に縮径して透明母材になる過程が良くわかる。

表1にグレーデッド形多モード光ファイバ母材合成パラメータの典型例を示すように、多孔質母材(表1はコア用母材合成例である)の成長速度は0.5~1g/minであり、通常作製する母材寸法は光ファイバで20~50kmに相当するもの

Fig.2. Porous preform. The upper part of preform was consolidated into transparent preform.

Table 1. Typical fabrication conditions by VAD method.

項目	内 容
堆積速度	0.5~1 g/min
母材寸法	25mm ϕ × 200mm ^L (30km光ファイバに相当)
伝送損失	2.2~2.7dB/km ($\lambda=0.85\mu\text{m}$) 0.5~0.8dB/km ($\lambda=1.3\mu\text{m}$) 0.25~0.5dB/km ($\lambda=1.55\mu\text{m}$)
伝送帯域	800MHz · km ($\lambda=0.85\mu\text{m}$) 1200MHz · km ($\lambda=1.3\mu\text{m}$)

である。

単一モード光ファイバ用母材を合成する際、厚いクラッド層の同時合成が不可欠である。このため、細径コア用多孔質母材を実現する条件と、厚いクラッド合成技術が必要になる。単一モード光ファイバについては一節設けて説明する。

2.2. 製造プロセス

2.2.1 材料

石英系光ファイバ用組成は製造方法によらず基本的に同じであり、 SiO_2 を主成分として屈折率や膨張係数、軟化温度を変えるため GeO_2 や B_2O_3 、 P_2O_5 、 F などを添加する。 B_2O_3 は後述するように $1.2\mu\text{m}$ 以上の波長で吸収損失の原因になるため、VAD法では使用していない。 SiO_2 、 GeO_2 、 P_2O_5 などは気相化の容易性や反応制御性の点から SiCl_4 、 GeCl_4 、 POCl_3 などのハロゲン化合物を利用して得る。また GeO_2 は屈折率の制御性が P_2O_5 に比較して良好なため、主ドーパントとして使用する。図3にドーパント濃度とガラスの屈折率の関係を示すように、 SiO_2 の屈折率($n_d=1.458$)を1%高めるに必要な GeO_2 は10モル%である。

Fig. 3. Relation between dopant concentration and refractive index of doped silica glass

2.2.2 低損失化技術

光ファイバの損失はガラス組成により決定される本質的な損失と、製造技術に関する外来的損失からなる。前者は光ファイバを構成する原子の電子遷移に基づく紫外吸収損失、分子振動に基づく赤外吸収、ガラスがもつ微視的な組成ゆらぎと密度ゆらぎに基づく Rayleigh 散乱、分子振動と光波の結合に基づく Brillouin 散乱、Raman 散乱によって生じる。後者は OH 基などの不純物吸収、導波路構造の不完全性に基づく散乱によって生じる。

低損失光ファイバは組成の適正化と製造技術の高度化によって得られる。Izawa 等¹¹と Osa-

nai 等¹²は各種ドーパントを含む石英ガラスの赤外吸収スペクトルを調べ、 B_2O_3 は $1.2\mu\text{m}$ 以上の波長に赤外吸収損失を与えることから、長波長帯で低損失な光ファイバ作製にとって望ましくないドーパントであることを示した。Brillouin 散乱や Raman 散乱はコア径 $10\mu\text{m}$ の光ファイバに入射する光パワがそれぞれ数 10mw, 数 W 以上に達すると生じるもので、¹³ 半導体レーザーを光源とする通常の使用条件下では無視できる。

VAD法で合成する多孔質母材には酸水素炎に基づく OH 基が約 200ppm 含有され、これを乾燥雰囲気中で透明ガラス化した母材にも 5~30ppm もの OH 基が残留し、⁹ 光ファイバの損失を高める。この残留 OH 基はガラス微粒子 $0.05\sim 0.2\mu\text{m}$ 表面に孤立状で存在する OH 基が単純な熱処理で除去されないものである。この残留 OH 基も塩素化剤(SOCl_2 , Cl_2)雰囲気中で加熱することで取除くことができる。

図4はVAD多孔質母材を SOCl_2 雰囲気中で

Fig. 4. Residual OH-ion concentration in the preforms dehydrated at different temperature. dehydration period; 2 hours

熱処理した際、母材中に残留する OH 基濃度と熱処理温度の関係を示す¹⁴ SOCl_2 は 700°C 程度の温度で分解し活性な Cl_2 を放出し、この活性 Cl_2 と表面 OH 基と結合して OH 基を取除く。

この結果, 700℃近傍で残留OH基は30ppmから1ppm以下に減少する。多孔質母材は約1200℃の温度から焼結を開始し, この温度以下で脱水処理を施した母材が再び水分を含む雰囲気さらされると再度OH基により汚染されてしまう。このことは多孔質母材の脱水処理を多孔質母材が焼結を完全に終了するまで続ける必要があることを意味する。

OH基は表2に示すように,¹⁵⁾ 2.73 μ mに基本吸収が, 1.39 μ m, 0.95 μ mに第一次, 第二次高

Table 2. OH-ion absorption wavelengths.
OH-ion concentration measured in fiber is 1200 ppm.

波長(μ m)	振動モード	損失(dB/km)
0.60	$5\nu_3$	6
0.64	$2\nu_1+4\nu_3$	1
0.68	$\nu_1+4\nu_3$	4
0.72	$4\nu_3$	70
0.82	$2\nu_1+3\nu_3$	4
0.88	$\nu_1+3\nu_3$	90
0.945	$3\nu_3$	1,000
1.13	$2\nu_1+2\nu_3$	110
1.24	$\nu_1+2\nu_3$	2,800
1.39	$2\nu_3$	65,000
1.90	$2\nu_1+\nu_3$	10,300
2.22	$\nu_1+\nu_3$	260,000
2.72	ν_3	10,000,000

但し光ファイバ中のOH基濃度
1,200ppm

調波成分の吸収が現われる。また, 1.24 μ mにOH基とSiO₄分子振動の結合吸収が現われる。先に述べた様に, 多孔質母材の脱水処理によりOH基濃度は容易に0.1ppm以下に低減化され, OH基の吸収損失は急激に減少する。VADの透明母材は酸素素火炎で加熱延伸するとともに200ppm程度OH基を含有する石英ガラス管でジャケットし線引きするため, OH基が外部から拡散する。一層の低OH化には拡散OH基の影響を除くため, 合成クラッド層を形成しなければならない。また図5にCl₂ガス分圧と残留OH基濃度との関係を示すようにCl₂ガス分圧

Fig. 5. Residual OH-ion concentration v. s. partial pressures of chlorine gas.

増加とともに残留OH基量は減少する¹⁶⁾脱水処理の完全化と, 合成クラッド層の合成によりOH基吸収損失は0.1dB/km($\lambda=1.39\mu$ m)以下に減少する。¹⁷⁾図6はVAD法の開発以来, 各年度毎の損失低減化の様子を示している。

Fig. 6. Loss reduction tendency of VAD fiber, The lines denoted by A, B, C, and D represent the best data in each year (A, 1977; B, 1978; C, 1979; D, 1980).

2.2.3 屈折率分布制御技術

VAD法の屈折率分布は, OVPO法やMCVD法のように層毎に異なる組成のガラス膜を堆積して屈折率分布を層近似するものとは異なり, 多孔質母材成長端面で空間的にドーパント

濃度の異なるガラス微粒子を堆積して実現する。

このような空間的に屈折率分布を形成するVAD法の場合、ガラス微粒子の堆積特性が中心的な役割を演じる。すなわち、 SiCl_4 と GeCl_4 を酸水素炎とともにバーナより噴き出し、反応によって生じるガラス微粒子を多孔質母材端面に堆積する際、堆積したガラス微粒子内の GeO_2 含有量は、多孔質母材表面温度に応じて図7に

Fig. 7. Deposition property of SiO_2 - GeO_2 material system. The GeO_2 concentration was determined by optical absorption spectra

Fig. 8. Surface temperature distribution on porous preform during fine glass particle deposition period. The surface temperature distribution was measured by two dimensional opto-thermometer.

示すように変化する。¹⁸ 表面温度が400°C以下の領域では GeO_2 は六方晶の結晶として堆積し、400°C以上の温度領域では GeO_2 は SiO_2 と固溶

Fig. 9. Wavelength dependence of bandwidth of optimally fabricated VAD graded-index optical fiber.

して堆積し、しかも固溶量は温度上昇とともに増加する傾向をもっている。

VAD法の屈折率分布制御はこのガラス微粒子の堆積特性を積極的に利用するものであり、図1に示す温度計は多孔質母材の表面温度分布

Fig. 10. Effect of refractive index fluctuation on bandwidth characteristics. Axial fluctuation gives smaller bandwidth reduction than coaxial fluctuation in optical fibers.

を測定するために使用する。図8はこの温度計によって測定した温度分布である。¹⁹⁾ 詳細な屈折率分布制御には、多重構造のバーナを用いドーパント濃度の異なる原料を異なるノズルから噴出しドーパントの空間拡散も合せて利用して行う。¹⁵⁾ 最適な製造条件下で作製したグレーデッド形光ファイバの屈折率分布は、Olshanskyの提案した最適屈折率分布係数になり、²⁰⁾ 図8に示すような広帯域伝送特性²¹⁾を示す。

一方、VAD法は母材を回転させながら合成するため、スパイラル状の屈折率の微小なゆらぎが生じる。このスパイラル状の屈折率ゆらぎは、MCVD法光ファイバに発生する同心円状の屈折率ゆらぎに比べ、伝送帯域を劣化させる効果は小さい。図10は理想的屈折率分布、スパイラル状屈折率ゆらぎ、同心円状屈折率ゆらぎをそれぞれもつ光ファイバの伝送帯域を示す。²²⁾ スパイラル状屈折率ゆらぎの存在は伝送帯域を低下させる効果は小さく、VAD光ファイバの優位性を示すものである。

3. 連続化技術

VAD法の特徴の1つは連続的に長尺母材を作製することである。連続化工程にあつては多孔質母材の合成速度と透明化速度を整合させなければならない。また透明化と脱水処理を同時に行いうる電気炉も開発²³⁾されており、最近条件の定式化も行なわれている。

連続工程での母材の引上速度 V は(1)式で与えられる。²⁴⁾

$$V = a(1 + b)V_0 \quad (1)$$

ここで、 V_0 は多孔質母材の成長速度、 a は多孔質母材の収縮率であり多孔質母材の見掛け密度 d_s で関係づけられる。 b は透明化領域における透明母材の延伸率であり、 a と b はそれぞれ(2)(3)式で与えられる。

$$a = 3\sqrt{b_s/b_0} \quad (2)$$

$$b = (F/\eta A)t \quad (3)$$

ここで F は多孔質母材の重量、 b_0 は透明母材の

密度、 η は透明化温度での粘性係数、 A は透明母材の断面積、 t は母材が高温領域を通過するに要する時間である。(1)～(3)式から V に関する式(4)が得られる。

$$V = 3\sqrt{d_s/d_0} [1 + (F/\eta A)t] V_0 \quad (4)$$

(4)式に代表的な各数値($d_0 = 2.2 \text{ g/cm}^3$, $d_s = 0.3 \text{ g/cm}^3$, $F = 3.46 \times 10^4 \text{ dyne}$, $\eta = 5 \times 10^8 \text{ poise}$, $A = 3.14 \text{ cm}^2$, $t = 1500 \text{ sec}$)を代入すると、 $V = 0.68 V_0$ が得られ実測値と良い一致を見た。

多孔質母材の合成を30hr 続け、外径20mm、長さ1000mmの透明母材を得た。母材寸法は約700gであり、この母材から100kmの光ファイバを線引きし特性を測定した結果、長手方向の特性変動も少なく、連続化技術が有効であることも実証した。図11は連続工程中の写真である。

Fig. 11 Continuous fabrication of high silica fiber preform.

4. 単一モード光ファイバ

単一モード光ファイバはモード分散がなく、グレーデッド形多モード光ファイバに比べ広帯域な伝送特性をもっている。単一モード光ファイバはコア径、コアとクラッドの屈折率差と使用波長によって決まる規格化周波数 V が2.405より小さい領域の光ファイバであり、基底モー

ドのみが伝搬される。すなわち、 V は(5)式で与

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 2.405 \quad (5)$$

えられる。 a はコア半径、 λ は波長、 n_1 はコアの屈折率、 n_2 はクラッドの屈折率である。 $V = 2.405$ が成立する波長をカットオフ波長と呼び、この波長より短い波長では多モード光ファイバになる。 $n_2 = 1.458$ (石英ガラス) $n_1 - n_2/n_1 = 0.002$ カットオフ波長を $1.2\mu\text{m}$ とするとコア径($2a$)は約 $10\mu\text{m}$ になる。

単一モード光ファイバをVAD法で作るにはまず、コア用の細径の多孔質母材を作り、その外側に厚いクラッド層の多孔質体を堆積する。単一モード光ファイバを伝搬する光は、コアのみならずクラッド層も伝搬するため、クラッド部も低損失であるとともに、低損失クラッド層外径はコア径の5倍以上でなければならない。

VAD単一モード光ファイバの場合も、透明母材を延伸後光ファイバの規格値に合わせるため石英ガラス管でジャケットする。このようにして得られた単一モード光ファイバの損失波長特性を図12に示す。²⁵⁾カットオフ波長は $1.2\mu\text{m}$ $\Delta n = 0.28\%$ であり、最低損失は $1.55\mu\text{m}$ で 0.2 dB/km

Fig. 12 Loss spectrum of VAD single-mode fiber. OH absorption loss increase at $1.39\mu\text{m}$ is about 0.1 dB/km (solid line indicates the VAD single-mode fiber loss spectrum and the broken line indicates the MCVD single-mode fiber loss spectrum).

km , 0.5 dB/km 以下の低損失波長領域は $1.2\mu\text{m} \sim 1.75\mu\text{m}$ に開いている。OH基による $1.39\mu\text{m}$ の吸収損失値は 0.1 dB/km と極めて低くなっている。また図13(a)は 100 km 長の光ファイバに相当する母材で外径 50 mm 、可線引部は約 100 cm である。図13(b)は同種の母材から線引した 100 km ファイバである。²⁶⁾

Fig. 13 VAD single-mode fiber preform and 100 km single-mode fiber. (a) preforms, Upper: VAD single-mode fiber preform. Lower: MCVD single-mode fiber preform. (b) 100 km VAD single-mode fiber wound on 30 cm diameter drum.

VAD法では中実化工程を必要とせずコア中央部に屈折率の凹みを生じないことから、特に屈折率差を大きくして $1.55\mu\text{m}$ 帯でパルス拡がりをを零にした $1.55\mu\text{m}$ 帯零分散単一モード光ファイバ作製にとり有利になる。図14は比屈折率差 $\Delta n = 0.76\%$ 、零分散波長を $1.55\mu\text{m}$ に合せた単一モー

Fig.14 Loss spectrum and dispersion characteristics of 1.55 μm zero dispersion single-mode fiber.

ード光ファイバの損失波長特性と分散特性を示す。1.55 μm で0.35dB/kmの低損失値が得られている。²⁷⁾

5. 高NA光ファイバ

局内光伝送やデータバスなど短距離伝送ではLEDを光源に使用したり、コネクタ接続を多用するため、光ファイバの開口数の大きいものが望ましい。光ファイバの高開口数化にはコアの屈折率を高めるドーパント GeO_2 を多量に添加すれば良い。ドーパントを多く添加するとRayleigh散乱が増加し、損失が高くなる。また構造不完全性損失も高くなる傾向にあるが、VAD法の場合構造不完全性損失を低くおさえることができる。図15は $\Delta n=2.73\%$ のステップ形多モード光ファイバの損失波長特性で、1.6 μm で0.8dB/kmが達成されている。²⁸⁾

6. 今後の動向

VAD法は光ファイバ母材の連続合成方法として開発された。これまでの研究実用化に向けた精力的な技術開発により、製造プロセス技術は格段の進展をみた。この結果、OH基をほとんど含まない石英系光ファイバの理想的損失特性に近い光ファイバの実現、6.7GHz $\cdot\text{km}$ に達す

る超広帯域光ファイバの実現などに加えて、単一モード光ファイバ作製への適用など従来方法による光ファイバの特性を凌駕するに至った。

今後、光ファイバ通信は広い分野に適用されるとともに、光ファイバへの需要も急速に増加すると考えられる。こうした大量光ファイバ使用段階を考えると、光ファイバの量産化に対する要請も一層強まってくると予想される。

VAD法は時代の要請に応じて技術開発も、量産化技術への対応がせまられてくる。表3は現在我々が目標としている各パラメータであり、目標達成に向けて研究を進めている。関連する技術、すなわち大型母材による高速線引技術、光ファイバの高強度化技術、ケーブル化技術の向上に多くの研究者、技術者が携わっており、展望も明るいものがある。

Table 3 Present and future aspect of VAD process.

項 目	現 状	目 標
堆 積 速 度	20~100g/hr	100~300g/hr
母 材 寸 法 (光ファイバ長相 ²⁹⁾)	5~50km	100~500km
線 引 速 度	50~100m/min	100~300m/min

参 考 文 献

- 1) L. C. Kao and G. A. Hockham: Proc. IEE, 133 (1966)1151
- 2) F. P. Kapron, D. B. Keck and R. D. Maurer, Appl. Phys. Lett, 17(1970) 423
- 3) J. B. Mac Chesney, P. B. O'Connor, F. V. DiMarcello, J. R. Simpson and P. D. Lazay, Proc. Int. Congr. Glass, 10th, 6(1974)40
- 4) W. G. French, J. B. MacChesney, P. B. O'Connor and G. W. Tasker, Bell Syst. Tech. J, 53 (1974)951
- 5) M. Horiguchi and H. Osanai, Electron. Lett, 12(1976)310
- 6) T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T. Miyashita, Electron. Lett. 15(1979)106
- 7) T. Kimura and K. Daikoku, Opt. Quantum Electron. 9(1977)33
- 8) P. C. Schultz, Proc. IEEE, 68(1980)1187
- 9) T. Izawa, S. Kobayashi, S. Sudo and F. Hanawa Proc. IOOC 77 C1-1(1977)375
- 10) S. Sudo, T. Edahiro and M. Kawachi, Trans. IECE of Japan, E63(1980)731
- 11) T. Izawa, N. Shibata and A. Takeda, Appl. Phys. Lett, 31(1977)33
- 12) H. Osanai, T. Shioda, T. Moriyama, S. Araki, M. Horiguchi T. Izawa and H. Takata, Electron Lett, 12(1976)549
- 13) S. E. Miller and A. G. Chynoweth ed. 「Optical Fiber Telecommunication」 Academic Press (1979)147
- 14) T. Edahiro, M. Kawachi, S. Sudo and N. Inagaki, Trans. IECE of Japan, E63(1980)574
- 15) P. Kaiser, Appl. Phys. Lett, 23 (1973)45
- 16) T. Moriyama, O. Fukuda, K. Sanada, K. Inada, T. Edahiro, and K. Chida, Electron. Lett. 16(1980)698
- 17) F. Hanawa, S. Sudo, M. Kawachi. and M. Nakahara, Electron. Lett, 16 (1980)699
- 18) T. Edahiro, M. Kawachi. S. Sudo and S. Tomaru, Jpn J. Appl. Phys. 19 (1980)2047
- 19) S. Sudo, M. Kawachi, T. Edahiro and K. Chida, Electron. Lett. 16 (1980)152
- 20) R. Olshansky, Rev. Modern Phys. 51(1979)341
- 21) K. Yoshida, S. Shibuya, K. Kokura, S. Sentsui, T. Kuroha, M. Nakahara, and N. Inagaki, Proc. ECOC 6th(1980)6
- 22) K. Okamoto, T. Edahiro, and M. Nakahara, Appl. Opt. 20 (1981)
- 23) K. Chida, F. Hanawa, M. Nakahara, and N. Inagaki, Electron. Lett, 15 (1979)835
- 24) M. Nakahara, K. Yoshida, M. Yoshida, O. Fukuda, Proc. IOOC '81 WD4 (1981)
- 25) S. Tomaru, M. Yasu, M. Kawachi and T. Edahiro Electron Lett. 17(1981)92
- 26) M. Kawachi, S. Tomaru, H. Yasu, Horiguchi, S. Sakaguchi, and T. Kimura, Electron. Lett, 17(1981)57
- 27) S. Tomaru, M. Kawachi, M. Yasu, T. Miya, and T. Edahiro, to be published in Electron. Lett.
- 28) N. Shibata, M. Kawachi, S. Sudo and T. Edahiro, Electron. Lett, 15(1978)680 1979