



10 μm 帯光ファイバー

日 高 建 彦

電子技術総合研究所 〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

最近、主として炭酸ガスレーザー光用光ファイバーの開発が活発化してきた。炭酸ガスレーザーはすでに実用期に入り、レーザー加工、医療、光学計測、画像処理、さらには通信への応用も始まっている。それゆえ、当然のことながらそのレーザー光を低損失で導波できる可撓性光ファイバーへの期待が高まっている。

さて、石英 SiO_2 を主体とする現在の光ファイバーは、10 μm 帯ではまったく使えない。そのほか、重金属 (Ge, Te) 酸化物ガラスファイバーも試作されているが、すべて 10 μm 帯の吸収はきわめて強く、この系統の材料に関しては、現在のところ 10 μm 帯光ファイバーを実現できる見込みはなさそうである。

10 μm 帯光ファイバーとして、現在いろいろな種類および構造が提案されていて、それぞれが将来性を主張し合っており、石英系ファイバーと比較するとバラエティ豊かである。まず、大分類すると、(I) 充填コア型と、(II) 中空型に分けられる。さらに、(I) はハライド系単結晶ファイバー、ハライド系多結晶ファイバー、カルコゲナド/フッ化物ガラスファイバーに小分類される。中空コア (ホロー) ファイバーは金属中空型導波路、誘電体内装導波路、および酸化物ガラス中空ファイバーに分類される。

さて、第 I の充填コア型であるが、まず、コア材料と考えられている素材の基本的な損失特性を図 1 に示す。短波長側の損失は電子遷移による吸収により、長波長側のそれは格子振動による吸収である。10 μm 帯での損失として問題になるのは格子振動による吸収である。格子振動周波数 Ω_1 は

$$\Omega_1 = \sqrt{k/\mu^*}$$

k は力の定数、 μ^* はその振動モードにかかわる有効質量である。 Ω_1 より十分高周波側では吸収は $\exp[-(\omega/\Omega_1)]$ のテイルをもつ。図 1 を見ると、重金属ハロゲン化物光ファイバーの最低損失は $\sim 8 \mu\text{m}$ で 10^{-2} dB/km 以下が期待でき、これがもし実現すれば、現存の光ファイバーの特性 (0.2 dB/km) をはるかに上まわるまさに夢の伝送路となり、通信の分野からも強い関心がもたれてい

る。すなわち、中赤外帯光ファイバーは炭酸ガスレーザー光 (10.6 μm) 用として、および波長は特定しないがともかく超低損失を得ようとの二つのアプローチであった。

まず、小分類中の単結晶ファイバーであるが、これは CsBr で成功している¹⁾。ノズル付ルツボ内で高純度 CsBr を溶解し、ノズルより滴下する融液を適宜な温度勾配中で連続的に単結晶化させ、ローラで外部に引き出す。成長速度は 1 cm/min 程度。損失の原因は不純物以外には、結晶成長時の表面欠陥が重要である。欠陥の数や大きさは成長条件に強く依存する。塑性変形による滑り線の発生はもちろん損失の大きな原因であるが、これは as grown 結晶にはない。測定された範囲内では、損失最低の波長は $\sim 5 \mu\text{m}$ で 0.1 dB/m 以下、10.6 μm では 0.4 dB/m であった。10.6 μm での損失の原因は不純物イオン SO_4^{2-} 、 NO_2^- 、 CO_3^{2-} の共鳴吸収 (中心はおおの 9, 8, 7.3 μm) のテイルによる。もしこれらを十分除去できれば、10.6 μm で 0.1 dB/m 以下の損失も可能であろう。伝送可能な電力容量は 1 mm ϕ コアで約 50 W。

次の多結晶ファイバーであるが、これは主として KRS-5 (TlBr-TlI 混晶) で製造されており、最初は米ヒューズ社が試みたものであるが、以降日本を中心に、数社が開発中である²⁻⁴⁾。その他 AgCl, AgBr も試されたが可視～紫外光で分解し、かつ 10 μm での損失もやや大きい。製造法は熱間押し出し法、すなわち適当なダイス付コンテナ中で KRS-5 等を所定温度 (200 \sim 350 $^\circ\text{C}$ 、融点は 415 $^\circ\text{C}$) で油圧ピストンで押し出す。押し出された KRS-5 は塑性変形し、多結晶化する。この場合、できた多結晶のグレインは 20 \sim 50 μm で、これによる散乱も損失の一因となる。不純物による損失は前と同じく SO_4^{2-} 、 NO_2^- 、 CO_3^{2-} によるが、吸収スペクトルは CsBr 単結晶の場合ほどシャープではない。ファイバーとしての損失は現状で 0.3 \sim 0.4 dB/m、電力容量は 100 W (1 mm ϕ) で、単結晶ファイバーよりはやや良好である。これらのデータは、短距離 (2 \sim 3 m) のエネルギー伝送

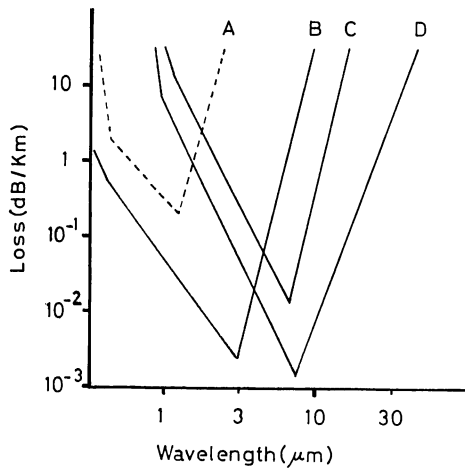


図1 各種ファイバー用材の損失特性
A: 石英, B: フッ化物ガラス, C: カルコゲンガラス, D: 重金属ハロゲン化合物, Aのみ実測値, 他は予想のみ.

用として実用になりそうである。可撓性ファイバーとして使った場合、くり返し曲げによる劣化は最大50,000回まで異常がないというデータもある³⁾。上記のハライド系ファイバーは、クラッド材として、有機高分子が使われているが、損失がかえってクラッド材のない（すなわち空気）場合よりも大きくなる場合もあり、本格的なコア-クラッド構造を蒸着などで作ることが試みられている。

カルコゲンガラス (As/Ge-S/Se) は赤外透過性があり、長波長光ファイバーの可能性が出てきた^{5,6)}。As-S系ガラスは、光ファイバーとしては5 μm までであろうがAs-Seガラスは10 μm までの可能性がある。ただし、10.6 μm では、格子振動の吸収のテイルにかかるので1dB/m以下にするのは困難である。不純物吸収はS/Se-H, As/Ge-O結合の振動による吸収であり、前者は4~5 μm 、後者は15および18 μm である⁶⁾。

フッ化物ガラスも赤外長波長でよい透過性をもっているため、10 μm 帯の光ファイバーの可能性は残されているが、現在のところデータは公表されていない。以上で充填コア型光ファイバーを終わるが、このうちでいちばん進んでいるのはKRS-5ファイバーであり、一部商品化されている。

次に、中空型光ファイバーにうつる。これは、10 μm 帯ないしはそれ以上の長波長光に有効と考えられる。第1は金属導波管型導波路である^{7,8)}。これには、平行平板型と円筒導波管があり、それぞれ、同じ型のマイクロ導波管と原理を等しくする。平板型というのは、幅

5~10mm、間隔0.25~0.55mmの、長方形の断面をもつ金属導波管のことである。材料はアルミニウム、損失として1dB/m程度であるが、断面が長方形のためフレキシビリティが等方的でなく、使いにくい。ツイスト型が提案されている。同じく、円型導波管タイプ光ファイバー（内径1~2mm）も提案されているが、最低伝送損失を与えるモードはTE₀₁サーキュラーモードであり、これは通常のレーザーの出力光（直線偏波）とは結合しない。結合モードはTE₁₁モードであるが、損失が大きい。TE₀₁サーキュラーモードで発振するような炭酸ガスレーザーも考えられているが、効率が落ちる。

誘電体内装金属導波管は、前述の円型金属の内面に適当な誘電体 (Ge等) を所定の厚さに付着させ、その効果により低損失を得ようというものである^{9,10)}。この場合、最低損失モードはHE₁₁（直線偏波）で、等価な金属TE₁₁モードより低損失になる。現在のデータとして、1.5mm ϕ で0.46dB/mが得られている¹⁰⁾。長尺のファイバーを作ることにってはやや問題がありそうである。

最後に、中空円筒酸化ガラス導波路についてであるが、酸化ガラスは中赤外 (~10 μm) で、格子振動による異常分散で屈折率が1より小さくなりうるという事実を利用したものである¹¹⁾。これは、同じ中空でも、前二者とはまったく原理を異にする。前二者の材料の屈折率は1より大きい。屈折率が1より小さい波長域は、材料としての吸収も強いので、クラッド材として使ったとしても超低損失は望めないが、1mm ϕ の円型光ファイバーで0.05dB/m程度が期待できる。屈折率が1よりも小さい波長域は物質により異なり、また比較的狭帯域である。そこで、たとえばSiO₂では最低伝送損失波長は~9 μm 、GeO₂では10 μm となり、通常の炭酸ガスレーザー光10.6 μm に一致していない。この酸化ガラスにK₂O等をドーピングすると、格子振動を長波長側へシフトさせることができる。GeO₂を出発材料とすれば、85GeO₂-10K₂O-5ZnOで10.6 μm が最低損失波長となり、炭酸ガスレーザー光に一致する。損失の実測値は1~1.5dB/m (1mm ϕ) である。

以上で10 μm 帯光ファイバーのあらましを紹介したが、そのうちのどれが生き残るか興味のあるところである。中空ファイバーは他波長域では考えられないファイバーである。中空であることを利用した、微小量気体分子の高感度分光が可能であり、面白いところであろう。

文 献

- 1) Y. Mimura, *et al.*: J. Appl. Phys., **53** (1982) 5491.
- 2) S. Sakuragi, *et al.*: Adv. Ceram., **2** (1981) 84.
- 3) S. Sakuragi: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **320** (1982) 2.
- 4) 木村正樹, ほか: 応物誌, **52** (1983) 313.
- 5) T. Miyashita, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **21** (1982) L75.
- 6) 金森照寿, ほか: 応物学会秋, 29 p-K-13 (1982).
- 7) F. Garmire: Appl. Phys. Lett., **29** (1976) 254.
- 8) F. Garmire: Proc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **320** (1982) 70.
- 9) M. Miyagi, *et al.*: IEEE J. Quantum. Electron., **QE-19** (1983) 136.
- 10) 本郷晃史, ほか: 電子通信学会全国大会春, 1106 (1983).
- 11) T. Hidaka, *et al.*: J. Appl. Phys., **53** (1982) 5484.

(1983年5月2日受理)