中空光ファイバとエネルギー伝送[†]

日高 建彦*

1. ま え が き

従来の石英系光ファイバの伝送波長は、ほぼ $2\sim 0.3\ \mu\text{m}$ である。これより外側の波長の光エネルギーを伝送させたい場合には、石英とは異なる材料、あるいは異なる構造の光ファイバを考案しなければならない。 $2\ \mu\text{m}$ より長い波長（中-遠赤外）領域においては、ふっ化物およびアルカリハライド系化合物が比較的透明であり、これらを用いた充填コアクラッド形光ファイバは、一部で商品化もされている。ところが、短波長側、すなわち真空紫外あるいはより短波長で透明な固体材料は存在しない。それゆえ、この波長域で使用する光ファイバとしては、全く別の原理に基づく、新構造の光ファイバを開発する必要がある。

図 1 固体の複素屈折率 $n_r - iK$
赤外域と真空紫外域で n_r が 1 より小さくなる領域がある。

一般に、固体（ガラスを含む）の屈折率は赤外および真空紫外-X線領域において真空、あるいは空気（1.0）より小さくなる可能性を持っている。

図 1 には、固体の複素屈折率を赤外から真空紫外域まで模式的に示した。赤外域においては、固体の格子振動の異常分散により、真空紫外域では電子のプラズマ振動により、複素屈折率の実数部が 1 より小さくなり得る。もし、屈折率が 1 より小さい固体（ガラスが望ましい）があれば、そのような素材をクラッド材として用いることにより、クラッド部分の屈折率がコア部、すなわち空気または真空の屈折率(1)より小さくなる。このことにより、通常のステップインデックス形光ファイバが構成できる。さてここで注意すべきことは、屈折率が 1 より小さい、ということは、光のエネルギー速度が媒質中で真空中での光速 C_0 より速くなるわけではない、ということである。屈折率の

値は、いわゆる位相速度だけを与え、エネルギー速度は常に C_0 よりも小さいことが保証されている。

本文において、まず赤外域、特に $10.6\ \mu\text{m}$ での炭酸ガスレーザー光に対して低損失伝送が期待される、二酸化ゲルマニウム (GeO_2) 中空ファイバについて簡単に触れ、次に最近、電総研で行なわれている中空形軟X線光ウェーブガイドの実験を紹介する。

2. 赤外用 GeO_2 中空ウェーブガイド¹⁾

赤外光伝送用光ファイバとしては、アルカリハライド、銀ハライド、あるいはカルコゲンガラスを用いた充填コア形光ファイバの研究が特に日本で伸展している。これに対してわれわれは、上述の原理に基づく、 GeO_2 (ジャーマネイトガラス) をクラッド材とする、 $10.6\ \mu\text{m}$ 炭酸ガスレーザー光をガイドするための中空ウェーブガイドを試作した。

図 2 SiO_2 と GeO_2 ガラスの $n_r - iK$
 GeO_2 においては n_r は $940\ \text{cm}^{-1}$ で 0.3 まで下がる。

図 2 は GeO_2 および SiO_2 (石英) の赤外域の複素屈折率を示している。これを見るに、 GeO_2 ガラスは $10.6\ \mu\text{m}$ ($940\ \text{cm}^{-1}$) で確かに屈折率 n_r が 1 より小さくなっている。これに対して、 SiO_2 は $1,030\sim 1,300\ \text{cm}^{-1}$ の範囲でだけ屈折率が 1 より小さくなり、炭酸ガスレーザー光に対しては効果は無い。この GeO_2 を使って、中空ウェーブガイドを作製した場合、複素屈折率の虚部 iK との関係で、純粋な GeO_2 では、ウェーブガイドとしての最低損失波長が $980\ \text{cm}^{-1}$ となり、レーザー光からは僅かに離れている。そこで、

[†] Hollow Optical Fibers and Energy Transmission

* 電子技術総合研究所

Takehiko Hidaka

紹介者 編集理事 大谷 義彦

GeO₂に波長調整剤としてK₂O, 安定剤としてZnOを加えることにより, 分光特性を低周波側へシフトさせ, 最低損失波長を940 cm⁻¹に一致させることができた. 安定剤ZnOは, K₂O 含有 GeO₂の潮解性を改善するためのものである.

図3 GeO₂-K₂O-ZnO ガラス 中空ファイバの伝送特性
口径1 mm, HE₁₁ モードに対する値. 3 角形の左右2辺の数値は GeO₂ のモル濃度(%), ZnO と K₂O のモル濃度は, 横軸の一目盛りを10 Mol % とする按分比例 (右辺よりが K₂O 過剰の状態).

図3はK₂O, ZnO含有量とそのときの光学特性(中空ファイバとしての最低損失波数とその損失の値)を示したものである. 損失は直線状の口径1 mmのファイバにおいて0.05 dB/mが期待できる. 図3の見方であるが, 左右2辺の数値はGeO₂のmol成分比であり, たとえば右辺の80の点はGeO₂が80 mol %, K₂Oが20 mol %ということである. さらに, 図中実線は, 伝送路としての損失が最低な波数を示し, 点数は口径1 mmでの伝送損失を与える. たとえば, 80 GeO₂-10 ZnO-10 K₂Oの点は, 最低損失波数は約950 cm, そのときの損失が0.1 dB/mということになる.

図4 80 GeO₂-10 K₂O-10 ZnO₂ ガラス中空光ウェーブガイドの伝送特性
理論的予想値および実験値

図4は, 実際に炭酸ガスレーザー光を伝送させた場合の損失特性である. 伝送損は最低でも理論値より一桁悪い. その原因として, ウェーブガイド内面の不完全さがあげられる. すなわち, 線引中に微小な GeO₂ の六方結晶が ZnO を核にして成長し, 特性を悪化させていることが判明している. 現在, 素材の組成を含めて改良中である.

3. X線ファイバの原理

さて前にも述べたように, 一般には固体においては赤外域と真空紫外-X線領域(1,000 Å以下)で屈折率(の実部 n_r)が1より小さくなる. 固体内の価電子のプラズマ振動数(おおむね1,000 Å)より十分高い振動数においては複素屈折率 n_r-iK は,

$$n_r=1-\frac{1}{2}(\omega_p/\omega)^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$K=\frac{1}{2}(\omega_p/\omega)^3 \cdot 1/(\omega_p \cdot \tau) \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる²⁾.

ここで, $\omega_p=\sqrt{4\pi Ne/m^*}$ は電子のプラズマ振動数である. N は電子密度, e は荷電, m^* は有効質量である.

図5 石英(SiO₂)の軟X線領域(10~100 Å)における n_r, K

図5には, 石英(SiO₂)の軟X線領域(100 Å以下)における, n_r-iK が模式的に示されている³⁾. n_r の値は, たとえば50 Åでは0.99であり, これは中空光ファイバのクラッド材としては使用に耐える値である. ただし, 損失項 K も無視できない値であるので, ファイバの曲げに対して損失増大の主因となる. 図5中, 23 Åにおける K のピークおよび n_r の曲がりは, 酸素原子の内殻電子の K 吸収によるものである.

X線伝送ファイバの効率を次のように評価してみる. X線の進行方向を90°曲げる場合を想定する. 石英平面板を1枚だけ使って反射させると, 入射角は45°であるから反射率は10⁻⁴%以下であり実用性はない. これに対して光ファイバは, 中空内面への入射角が90°に近いので反射率は大きくなり, 全体の伝送効率は90°曲げで1%を超えられる. このように, 中空光ファイバは平面板反射鏡に比し,

10⁴ 倍も効率が良いことが期待できる。

4. 軟X線伝送中空光ファイバの伝送特性

石英製中空ファイバの軟X線伝送特性を、次のようにして得た⁴⁾。

図 6 軟X線伝送特性測定のプロックダイアグラム

実験のプロックダイアグラムを 図 6 に示す。光源は電総研設置の軌道放射光 (SOR) であり、これを斜入射回折格子分光器で単色化した。スペクトル純度を向上させるため、適当なフィルタを使用した。単色化された光は、内径 0.2 mm、長さ 230 mm の石英製中空ファイバに入射し伝送される。出射光はセラミックチャンネルトロンで検出される。検出器からの電気出力は増幅され、マルチチャンネルアナライザで処理された後、パソコンのメモリに蓄積される。ファイバ入力端は固定され、その方向は入射ビームと平行である。出射端は、検出器とも入射方向に対して最大 90° まで回転する。この際、ファイバは全長にわたって均一な円弧を描く。伝送効率の角度依存性の一例を 図 7 に示す。定性的には理論値と傾向は一致しているが、全体的に効率は一桁ほど悪い。これは、入力端でのファイバの方向がX線ビームの方向から僅かにずれていることによると思われる。この入射部の角度ミスマッチを差し引いて考えると、伝送効率はほぼ理論値と一致すると考えられる。

図 7 伝送効率の角度依存性
各々上は 32 Å, 下は 68 Å

角度を一定にしたときの伝送効率の波長依存性を 図 8 に示す。細かいリップルのような物はあるが、全体としてあまり大きな波長依存性は無い。ただし 25 Å より短波長で損失は大きくなるが、これは、前に述べた酸素のK吸収による。また 45 Å 付近の弱いピークは、おそらく中空ファイバ内面に付着したカーボンCのK吸収 (43.5 Å) の影響によると思われる。

図 8 伝送効率の波長依存性

5. 考 察

伝送特性を眺めて、他の光ファイバとの比較で考えると損失はきわめて大きく、実用化の可能性は乏しいように思える。しかしながら、次のような理由により当X線ファイバの有用性が期待できる。まずともかくも、現状ではX線に伝送し得る光ファイバはほかには存在しない。それゆえ、損失がある程度大きくとも短距離でなら意味のある使い方があり得る。たとえば医療用に使う場合には、伝送距離も数m程度、曲げ角も 90° 以内での使用が容易に想定できる。この場合に、効率がたとえ 1 % であっても人体への不要な照射をさけ得たり、患部の至近距離から治療用X線を照射し得るので、その利用価値は大きいであろう。

応用について考慮すべきことは、軟X線 (10~100 Å) の空気透過率が非常に小さいことである。短波長になるほど透過率は向上するが (10 Å 以下)、固体の屈折率は 1 に近づき、光ファイバの構成が難しくなる。これを解決するには、幾つかの方法が考えられる。まず中空ファイバ両端をX線透過性箔膜で封止し、内部を真空に保つことである。このためには、使用X線に対して透明で、かつ一気圧に耐える膜材が必要である。表 1 に示したように、アルミ、ベリリウム、ポリイミド箔膜が使用可能である。あるいは特に 10 Å 以下の波長では、He を充填すれば効率は向上する。この場合、光出射端を解放しておき、He が流出する形式にしておけば、端面の汚れを押えることができ好つぐうである。

さらに抜本的な方法として、次のような方法が考えられ

表 1 気体および固体薄膜のX線透過率 (%)
気体は一気圧

波長 (Å)	N ₂ (1m)	He (1m)	Al (1 μm)	C (1 μm)	C (10 μm)	Polyimide (1 μm)
31.6			2.4	0.28		
22.3		2×10 ⁻⁹	21	8.5		
16.0		3.6×10 ⁻³	53	36	3.6×10 ⁻³	
10.44		4.3	82	73	4.3	~ 80
5.73	4×10 ⁻¹⁹	60	61	95	60	~ 98
2.78	0.46	90	93	99	90	~100
1.79	25	98	98	~100	98	"
1.25	64	~100	~100	~100	~100	"

る。

最近、X線領域での鏡の反射率を向上させる有効な手法として、軽金属-重金属を交互にコートして多層膜を作り、もって全体の反射率を飛躍的に向上させる技術が開発された⁵⁾。この方法を応用し、中空ファイバの内面に多層膜を作れば、特定の波長ではあるが斜め入射（入射角 89° 以上）の反射率を向上させることが可能である。これにより、光ファイバとしての伝送効率も大いに改善されるはずである。電総研ではこれらを含めてさらに改良中である。

謝 辞

X線伝送実験において、放射光施設の利用の便宜をはかっていただいた関係各位に深謝いたします。

付 録

中空X線伝送ファイバの理論的考察

ここでは、X線伝送ファイバの伝送効率の角度依存性について幾何光学的な考察を試みる。ファイバの断面は円形であるが、簡単のため正方形とする。図9のように、X線はファイバのコアクラッドの外側の面でだけ反射され、最終的に角度 ψ 曲げられる。入射X線と反射面とのなす角を δ とすると、X線は1回ごとに 2δ 曲がる。それゆえ、合計で ψ 曲げるためには、反射の回数 N は、

図9 中空ファイバ内面をX線が伝わる様子

図10 伝送効率の理論的波長依存性
23 Åの落ち込みは硫素原子のK吸収による。

$$N = \psi / 2\delta \quad \text{.....(A-1)}$$

1回当たりの反射係数を $R(\lambda, \delta)$ とすると、伝送効率 T は

$$T = R(\lambda, \delta)^N \quad \text{.....(A-2)}$$

である。軟X線領域では、 $R(\lambda, \delta)$ は

$$R \approx 1 - a(\lambda)\delta \quad \text{.....(A-3)}$$

で良く記述できる。 $a(\lambda)$ は R を δ で展開したときの比例係数。それゆえ式 (A-2) を使って、

$$T = \exp(-a(\lambda)\psi/2) \quad \text{.....(A-4)}$$

である。石英の $a(\lambda)$ を用いて角度依存性を求めたものが図7である。また波長依存性の計算値を図10に示す。この特性も実験値を良く説明する。

参 考 文 献

- (1) 日高ほか：“GeO₂-ZnO-K₂O ガラスを使った炭酸ガスレーザ光用中空光導波路”電総研彙報 48-5, 6 (昭59)
- (2) 工藤恵栄：“光物性の基礎”，オーム社 (昭52) 103
- (3) Henke, B. L. et al.: Atomic Data & N. Data. 27(1982) 27
- (4) Watanabe, M. et al.: “Soft X-ray transmission characteristic of hollow-core fused quartz fibers”, Appl. Opt. 23-12 (1985) 4206
- (5) Haelbich, R. P. et al.: “Smooth multilayer films suitable for X-ray mirrors”, Appl. Phys. Letters 34-3 (1979) 184

(受付1986年4月1日)