

テラヘルツ波伝送用中空光ファイバー

松 浦 祐 司

Hollow Optical Fibers for Delivery of Terahertz Wave

Yuji MATSUURA

Hollow optical fibers are proposed as a flexible and low loss delivery medium for terahertz wave. Metal hollow-optical fibers composed of flexible glass or plastic tubing with a silver thin film on the inside are fabricated by using mirror plating technique. The metal hollow fibers show low bend-induced losses because of the TE_{11} -mode-based transmission. To reduce the loss of the metal fibers, it is theoretically shown that loading a dielectric thin film on the inside of metal hollow fibers is effective. The dielectric-coated hollow fibers support hybrid modes that have lower attenuation constants than the TE_{11} mode. Two fabrication methods of dielectric-coated hollow fibers are shown and as expected from theory, the fibers fabricated by these methods show lower losses than the metal-only-coated hollow fibers due to interference effect of the inner dielectric layer.

Key words: terahertz waveguides, hollow optical fibers, terahertz spectroscopy, metal waveguides

産業およびバイオメディカル分野で各種のテラヘルツ応用が展開するにつれて、テラヘルツ波を伝送することが可能で、光領域におけるガラスファイバーのようにフレキシブルな導波路に対する要求が高まってきている。このような導波路が実現されれば、比較的大型な高出力テラヘルツ光源から、さまざまな対象物へ容易にテラヘルツ波を導き照射することが可能となり、各種試料のその場分析や、生物のインビボ測定を行うことができる。これまで各種のテラヘルツ導波路が提案、開発されてきているが、それらは次の4つのカテゴリーに分類できる。i) 誘電体導波路：テラヘルツ領域で透明なテフロンなどの誘電体をコアとするもの¹⁻³⁾、ii) フォトニック結晶ファイバー：フォトニック構造に起因する実効屈折率差もしくはフォトニックバンドギャップにより、コア部にテラヘルツ波を閉じ込めるもの⁴⁻⁶⁾、iii) 表面波伝送路：金属もしくは誘電体線路に表面波を誘起し伝送を行うもの^{7,8)}、そしてiv) 中空導波路である⁹⁻¹²⁾。i~iiiについては文献13に詳しい解説があるの

で参照されたい。中空導波路は構造が単純で、かつ高効率にテラヘルツ波とのパワー伝送が可能であるという利点をもつ。中空導波路についても、金属管⁹⁾や誘電体チューブ¹²⁾を用いたものがあるが、金属管を用いたものはおもに押し出し法で作製されるため、その内面粗さや形状の不均一性が伝送損失を上昇させる原因となる。この問題を解決するために、われわれのグループでは図1の構造に示すように、内面が平滑なガラス細管やプラスチックチューブの内面に金属薄膜を形成した中空光ファイバーを提案し、開発を行っている。

1. 中空光ファイバーのテラヘルツ波領域における伝送特性—理論的検討

ガラスやプラスチックで構成されたチューブ状母材の内面に金属薄膜を形成した中空光ファイバーは、その金属膜厚がテラヘルツ波に対するスキンドープより大きければ、金属中空導波路として機能する。波長より十分大きい直径

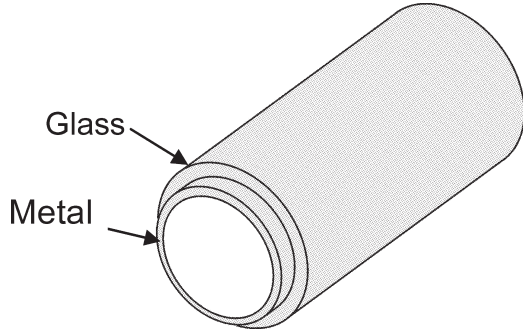


図1 金属中空光ファイバーの構造.

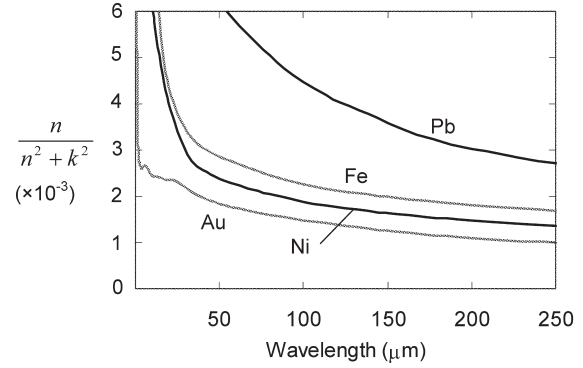


図4 各種金属の $n/(n^2+k^2)$ 計算値.

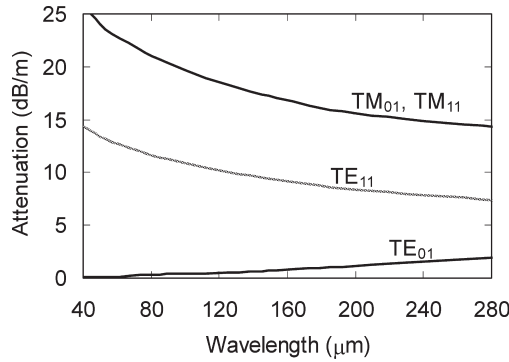


図2 金中空ファイバー (内径1 mm) における低次 TE, TM モードの伝送損失理論値.

をもつ金属中空導波路内においては、 TE_{01} モードが最低次モードとなり、さらに TM_{01} 、 TE_{11} 、 TM_{11} モードなどの高次モードが伝搬可能である。図2は、文献14、15に記載の手法で解析的に計算したこれら4つのモードのテラヘルツ領域における伝送損失である。なお、導波路は内径1 mmで金で構成されているものとし、その複素屈折率は文献16、17を参考とした。この図より、最低次モードである TE_{01} モードが最も低損失となっていることがわかる。しかし、図中のそれぞれのモードの電気力線の分布¹⁸⁾を図3に示すように、最低次モードである TE_{01} モードに結合させるには、円周状の電界分布をもち、かつそのパワ

ー分布がドーナツ状である必要があるために、通常のテラヘルツ光源から得られる直線偏光ガウシアンビームを用いるにはモード変換が必要となる。また、 TE_{01} モードは損失の大きな TM_{11} モードと縮退関係にあるために、わずかな形状変動などによりモード変換が生じる可能性がある。一方、 TE_{11} モードは、図3のような電気力線をもつために直線偏光のガウスビームとよく結合し、モード結合理論¹⁹⁾を用いて求めたガウシアンビームと TE_{11} モードの結合効率¹⁹⁾は90%以上となる。

内径 $2T$ の金属中空ファイバーにおける TE_{11} モードの減衰定数は

$$\alpha_{TE_{11}} = \frac{u^4}{u^2-1} \frac{n}{n^2+k^2} \left(\frac{1}{k_0^2 T^3} + \frac{1}{u^4 T} \right) \quad (1)$$

で与えられる¹⁵⁾。なお、 u は横方向位相定数で $u=1.841$ である。ここで n および k は、金属の複素屈折率の実部および虚部であり、この結果から $n/(n^2+k^2)$ が小さい値となるほど伝送損失が低くなることが期待される。図4は各種の金属^{16,17,20)} について計算した $n/(n^2+k^2)$ の値である。テラヘルツ領域においては金が最も低い値を示し、中空ファイバーの構成材料として適していることがわかった。

金属中空ファイバーをさらに低損失化するためには、フ

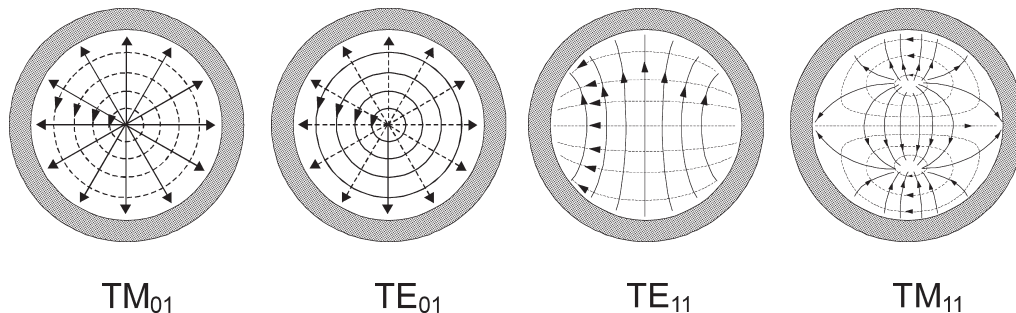


図3 低次 TE, TM モードの電気力線 (実線) および磁力線 (破線) 分布.

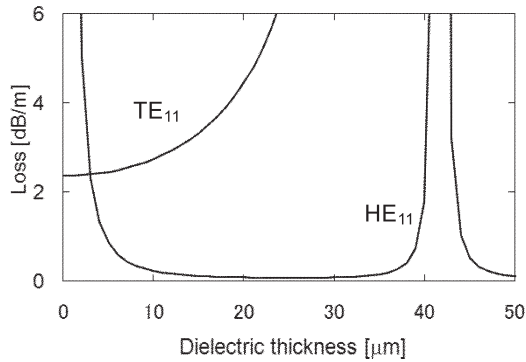


図5 誘電体内装中空ファイバー（内径3mm）の伝送損失理論値。

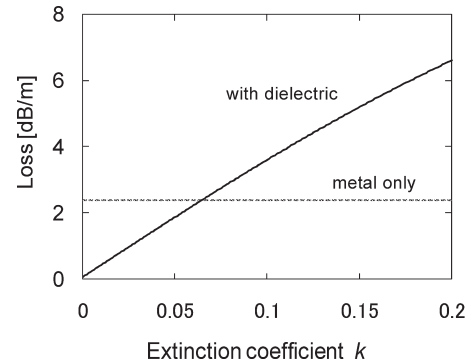


図6 誘電体内装中空光ファイバーの誘電体消衰係数と伝送損失の関係。

ファイバーの内面に誘電体薄膜を装荷することが有効である。誘電体内装金属ファイバーにおいては、ハイブリッドモードである HE_{11} モードが最低次モードとなり、直線偏波を結合しても低損失伝送が可能となる。 HE_{11} モードの伝送損失を最小とするためには、TEモードとTMモードの減衰定数の相加重平均を最小とすればよく、波長 λ における誘電体膜厚 d の最適条件は、TEモードに対する最適条件である $1/4$ 波長の光学膜厚に対して補正係数を乗じた次の条件で与えられる¹⁵⁾。

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{n_d^2 - 1}} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot 2 \tan^{-1} \left[\frac{n_d}{4\sqrt{n_d^2 - 1}} \right] \quad (2)$$

なお、 n_d は内装誘電体の屈折率である。そして、この条件における HE_{11} モードの減衰定数は次のように与えられる。

$$\alpha_{HE_{11}} = \frac{u^2}{2k_0^2 T^3} \frac{n}{n^2 + k^2} \left(1 + \frac{n_d^2}{\sqrt{n_d^2 - 1}} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 $u=2.405$ である。内径3mm、内装金属を銀とした場合の、波長200 μm における誘電体膜厚に対する HE_{11} モードの伝送損失理論値を図5に示す。誘電体材料の吸収はないものとし、 $n_d=1.5$ として計算を行った。あわせて金属中空ファイバーで支配的であった TE_{11} モードについても、その減衰定数を示している。誘電体層を3 μm 以上にすると、金属中空ファイバー (TE_{11} モード、膜厚0 μm) よりも損失が小さくなり、膜厚が20~30 μm のときに損失は最低となるため、伝送損失の大幅な低減が期待される。

次に、適切な内装誘電体材料を選択するため、誘電体層におけるテラヘルツ波吸収が伝送損失に与える影響を検討する。ファイバー内径を3mm、誘電体層の屈折率を1.5とし、誘電体の消衰係数 k をパラメーターとして計算した伝送損失理論値を図6に示す。この結果より、 $k < 0.065$ のときに誘電体内装の効果が得られることがわかる。そこ

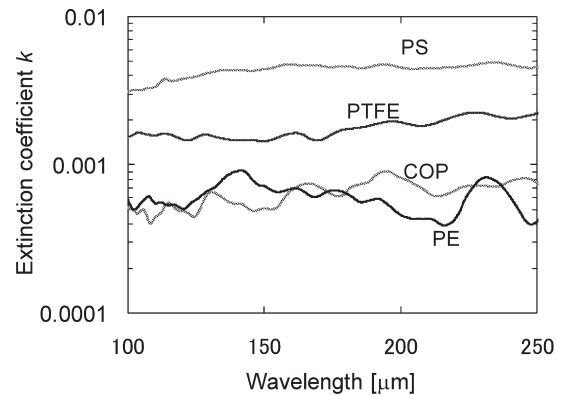


図7 各種有機樹脂材料の消衰係数測定値。

で、テラヘルツ帯で透明性が高く、レンズやファイバーへの使用が報告されているいくつかの誘電体材料について消衰係数を測定した。結果を図7に示す。測定はフーリエ変換赤外分光器を用いて行い、測定した試料は、環状オレフィンポリマー (COP: 日本ゼオン社製 ZEONEX480, $n=1.525$)、ポリエチレン (PE, $n=1.534$)、ポリスチレン (PS, $n=1.554$)、テフロン (PTFE, $n=1.445$) である。なお、計算に用いた屈折率は文献値であり^{21,22)}、環状オレフィンポリマーについてはテラヘルツ帯での報告がないため可視域における値を用いた。今回測定した試料はいずれも、 $k < 0.065$ の条件を満たしていた。その中でも、ポリエチレンと環状オレフィンポリマーの消衰係数の値が小さいという結果になった。

2. テラヘルツ波用中空光ファイバーの作製と伝送特性

2.1 金属中空光ファイバー

可撓性をもつガラスキャピラリーチューブおよびポリカーボネートチューブの内面に無電解メッキ法を用いて銀を成膜することによりファイバーを製作し、その伝送損失の波長特性測定を図8に示す測定系を用いて行った。テラヘ

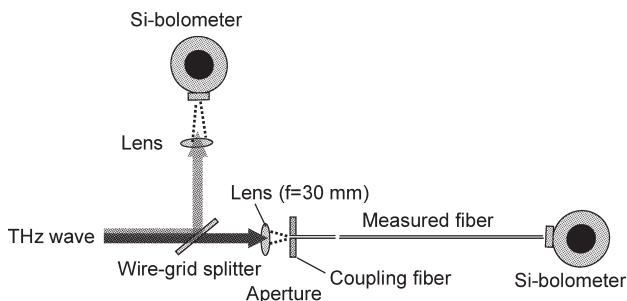


図8 テラヘルツ波長中空光ファイバー伝送損失測定系。

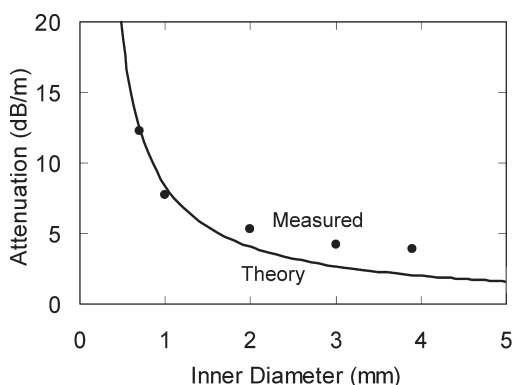


図9 銀中空ファイバーの伝送損失 ($\lambda=200 \mu\text{m}$) 実測値と TE_{11} モード理論値。

ルツ光源としては、 Q スイッチ Nd:YAG レーザー光をポンプ光とし、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ を用いた波長可変テラヘルツ波パラメトリック発振器 (TPO)²³⁾ を用いている。ワイヤグリッドスプリッターで入射するテラヘルツ波を2方向に分割し、Si ボロメーターで入射光強度をモニターしている。焦点距離 30 mm の TPX レンズで集光して結合ファイバーとなる短尺 (10 cm) の中空ファイバーに入射し、この結合ファイバーによって損失の大きいモードを除去し、 TE_{11} モードを効率よく励振している。

内径が異なるファイバーについて、波長 $200 \mu\text{m}$ において測定した伝送損失を TE_{11} モードの損失理論値とあわせて図9に示す。測定においては、ファイバー長が10~60 cmの6種類のファイバーを用い、カットバック法で損失を計算した。測定結果は、 TE_{11} モードの理論値によく一致しており、 TE_{11} モードが効率よく励振されていることがわかる。内径の大きいファイバーにおいて実測値が理論値を上回っているが、これはチューブ断面形状の不均一性が原因と思われる。

図10は、内径1 mm、長さ60 cmの中空光ファイバーの中央部分に曲がりを加えて測定した伝送損失である。2つの異なる曲率半径に対して、曲がりの角度を変化させな

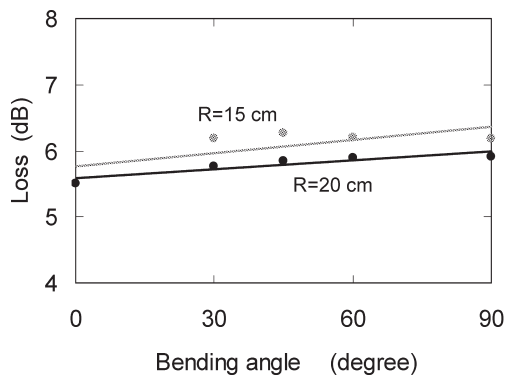


図10 銀中空光ファイバー (内径1 mm、長さ60 cm) の曲げ損失測定値。

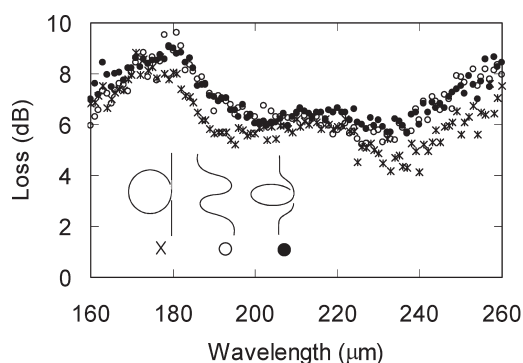


図11 各種形状の曲がりを加えた銀中空光ファイバー (内径1 mm、長さ1 m) の伝送損失測定値。

がら、波長 $200 \mu\text{m}$ において測定を行った。なお、偏光の方向は曲げ平面に対して垂直とした。より小さい曲げ半径 $R=15 \text{ cm}$ で90度の曲がりを与えた場合においても、曲がりによる付加損失は0.5 dB以下と小さくなった。これは、マイクロ波やミリ波においてすでに示されている TE モード伝送導波路は曲がりの影響が小さいという利点が、テラヘルツ領域においても現れたものである。

図11は、ファイバーに対して、ループ状、S字状、らせん状と3つの異なる曲げ形状を付加して測定した損失スペクトルである。これらの複雑な曲がりを加えてもほとんど損失の増加は生じず、どの形状においてもほぼ同じ損失スペクトルが得られた。また、これらの損失値は直線状ファイバーとほぼ同じものである。図10に示した実験とは異なり、この実験においてはさまざまな偏波方向のテラヘルツ波が入射していないにもかかわらず、その影響が小さいことから偏波依存性の小さい TE モードが伝送していることが確認できた。

2.2 誘電体内装金属中空光ファイバー

上述の金属中空光ファイバーの伝送損失は、内径1 mmのもので7.5~8 dB/mとなり、フレキシビリティ、損

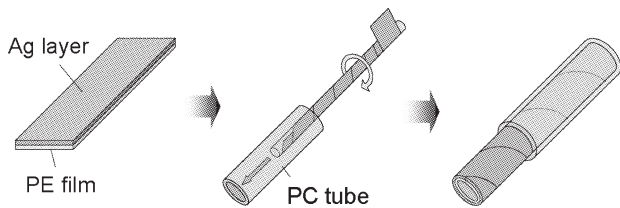


図 12 ポリエチレン内装中空光ファイバーの製作法.

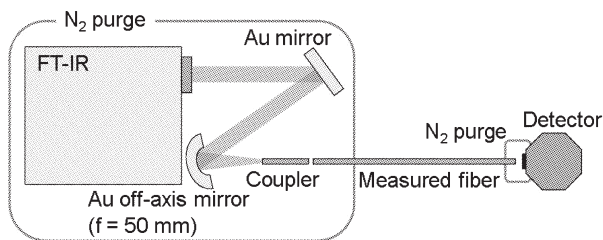


図 13 フーリエ赤外分光器による中空光ファイバー伝送損失測定系.

失ともに実用化を目指せるレベルであるが、これはほぼ理論値に達しているため金属中空ファイバーでこれ以上の損失の低減を目指すことは難しい。そこで、金属層の内側に誘電体層を装荷することで損失の低減を図った。テラヘルツ帯で吸収係数が小さな誘電体材料として、テフロンなどのフッ素系樹脂やポリエチレン (PE) などのポリオレフィン系有機樹脂などが挙げられる。そこで、容易に入手可能な PE フィルムを用いて、図 12 に示すような方法でファイバーを製作した。市販の厚さ $26\ \mu\text{m}$ の PE フィルムをストリップ状に切断し、片面にスパッタリング法を用いて銀層を形成後、そのストリップを銀層が外側になるようにらせん状にした状態で母材チューブ内に挿入することで誘電体内装ファイバーの構造を実現するという手法である。ファイバー母材としては、比較的口径が大きくても高い可撓性を有するポリカーボネートチューブを用いた。この方法では、ファイバー内に様な厚さの誘電体層を形成でき、誘電体層と金属層の間に隙間が生じない一方、フィルム同士の重なりによる段差が生じ損失の原因となる。

上記の手法を用いてファイバーを製作し、その特性評価を行った。製作したファイバーは内径 $3\ \text{mm}$ 、長さ $1\ \text{m}$ である。測定系を図 13 に示す。光源はセラミック光源および高圧水銀灯とし、Si ボロメーターを検出器としたフーリエ赤外分光器 (FT-IR) を用いている。分光器より外部に取り出した光を金コート平面鏡および軸外シミラーを用いて集光し、長さ $10\ \text{cm}$ の結合用中空ファイバーを経て、被測定ファイバーへと入射させている。集光系、ファイバー空孔内および検出部付近を窒素ガスでパージすること

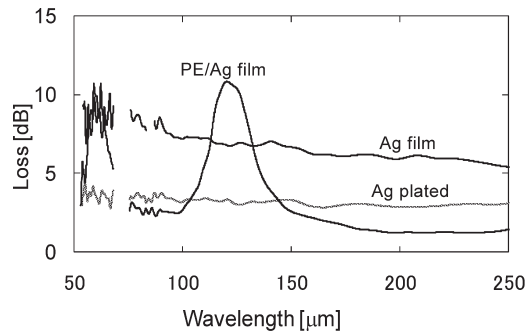


図 14 ポリエチレン内装中空光ファイバー、フィルム挿入法およびメッキ法により製作した銀中空光ファイバー (内径 $3\ \text{mm}$ 、長さ $1\ \text{m}$) の伝送損失スペクトル.

で、空気の吸収の影響を受けないようにした。

図 14 に、製作したファイバーのテラヘルツ波伝送損失スペクトルを示す。なお、比較のために、通常の方法で製作した同径の銀中空ファイバーと、PE フィルムに成膜した銀層がファイバーの内側に向くように挿入した銀中空ファイバーについても測定を行った。後者の 2 つのファイバーを比較すると、フィルム挿入型の銀中空ファイバーの損失が大きく表れているが、これはフィルム間の段差等の構造不整による付加損失である。フィルム挿入法により製作したポリエチレン内装ファイバーにおいても同様の損失上昇があると考えられるものの、その影響は小さく表れている。ポリエチレン内装ファイバーの損失スペクトルに表れている明瞭な干渉ピークから、様な誘電体層を形成されていることがわかり、波長 $150\ \mu\text{m}$ より長い領域において、その効果によって損失が大幅に低減されていることがわかる。波長 $200\ \mu\text{m}$ 付近における伝送損失は、約 $1.3\ \text{dB}$ ときわめて低い値が得られた。

次に、構造不整が小さく、より低損失な中空光ファイバーを実現するために、赤外光用中空ファイバーで誘電体層を内装する方法として確立されている、ポリマー送液法²²⁾を用いてファイバーの製作を行った。ポリマー送液法は、有機樹脂材料を溶媒に溶解させ、その溶液をファイバー内部に送液後、乾燥させるといった手法である。膜厚は溶液濃度と送液速度によって制御する。樹脂材料としては、ポリエチレンは耐薬品性が高くこの方法には適していないため、赤外光用中空ファイバーで用いられており、テラヘルツ帯でも透明性が高い環状オレフィンポリマー (COP) を用いることとした。COP をシクロヘキサンに溶解させ、 $22\sim 26\ \text{wt}\%$ の溶液を製作し、送液速度を $2\sim 3\ \text{cm}/\text{min}$ として、内径 $3\ \text{mm}$ 、長さ $30\ \text{cm}$ のファイバーに成膜を行った。製作したファイバーの誘電体膜厚に対する波長 $200\ \mu\text{m}$ の伝送損失を図 15 に示す。この結果より、理論値に

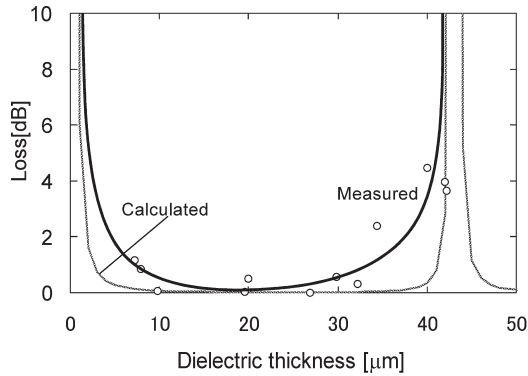


図15 液相法により製作したCOP内装中空光ファイバー（内径3mm、長さ60cm）の波長200 μm における伝送損失測定値と理論計算値。

は及ばないものの、誘電体膜厚が10~30 μm 程度のときに低損失となっており、理論値と同様の傾向を示すことがわかった。

上記の送液法により製作したファイバー、前述の金属中空ファイバー、ポリエチレンストリップ内装型中空ファイバーに対して曲げ損失測定を行った。測定においては、内径3mm、長さ1mのファイバーの入射端から30cmを直線状に保持し、残りの部分を一樣な半径で曲げた状態で伝送損失を測定した。結果を図16に示す。この結果より、誘電体を内装の方が曲げによる損失の上昇が小さいことがわかる。曲げ半径を30cmとしたときの付加損失はPEストリップ内装ファイバーで0.9dB、COP送液法によるファイバーで0.6dBとなり、COP内装ファイバーのほうが小さいことがわかった。PEフィルム内装ファイバーでは、曲げによって内部のフィルムがずれるなどファイバー内の構造不整が増加するが、送液法により製作したCOP内装ファイバーではそれがいないためであると考えられる。

急速に進展するテラヘルツ波用デバイスの中で、やや開発が遅れている感のあるテラヘルツ波伝送路であるが、ガラスや樹脂チューブの内面に金属および誘電体薄膜を形成した中空光ファイバーを紹介した。テラヘルツ波用導波路は、構造的には、赤外用のものアップスケールやミリ波・マイクロ波用のもののダウンスケールで対応が可能であるが、テラヘルツ波領域では透明性の高い材料がごく限られた樹脂しか存在しないため、適切な材料の選択が鍵となる。本稿では、赤外領域でおもに医療用レーザー装置のための伝送路として実用化されている中空光ファイバーを、テラヘルツ波領域へと適応させるために、材料および

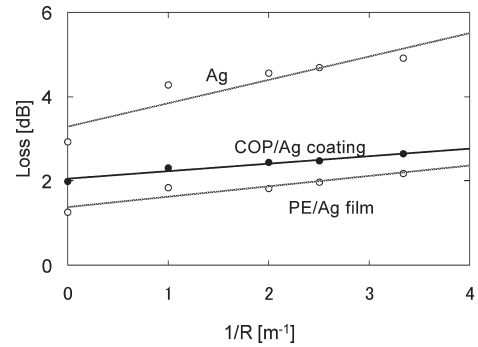


図16 液相法により製作したCOP内装中空光ファイバー、フィルム挿入法により製作したPE内装中空光ファイバー、およびメッキ法により製作した銀中空光ファイバーの波長200 μm における伝送損失の曲がり依存性。ファイバーはどれも内径3mm、長さ1m。

製法について検討を行った。その結果、実用に十分な伝送特性が得られ、その単純な構造ゆえに頑強かつ低コストである中空光ファイバーはすでにサンプルとして市販が開始されている*。現在はテラヘルツ波分光用ファイバークローブとしての開発をすすめており、将来的には医療用内視鏡との組み合わせによる診断システムなどを視野に入れている。そのためには、さらに柔軟性に富む細径ファイバーの開発が必須である。

文 献

- 1) R. Mendis and D. Grischkowsky: "Plastic ribbon THz waveguides," J. Appl. Phys., **88** (2000) 4449-4451.
- 2) S. P. Jamison, R. W. McGowan and D. Grischkowsky: "Single-mode waveguide propagation and reshaping of sub-ps terahertz pulse in sapphire fibers," Appl. Phys. Lett., **76** (2000) 1987-1989.
- 3) L. Chen, H. Chen, T. Kao, J. Lu and C. Sun: "Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguide," Opt. Lett., **31** (2006) 306-308.
- 4) H. Han, H. Park, M. Cho and J. Kim: "Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber," Appl. Phys. Lett., **80** (2002) 2634-2636.
- 5) M. Goto, A. Quema, H. Takahashi, S. Ono and N. Sarukura: "Teflon photonic crystal fiber as terahertz waveguides," Jpn. J. Appl. Phys., **43** (2004) L317-L319.
- 6) M. Skorobogatiy and A. Dupuis: "Ferroelectric all-polymer hollow Bragg fibers for terahertz guidance," Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 113514.
- 7) K. Wang and D. M. Mittleman: "Metal wires for terahertz waveguiding," Nature, **432** (2004) 376-379.
- 8) J. A. Deibel, K. Wang, M. D. Escarra and D. M. Mittleman: "Enhanced coupling of terahertz radiation to cylindrical wire waveguides," Opt. Express, **14** (2006) 279-289.
- 9) R. W. McGowan, G. Gallot and D. Grischkowsky: "Propagation of ultrawideband short pulses of terahertz radiation through submillimeter-diameter circular waveguides," Opt.

* 導光技術合同会社 <http://www.do-ko.jp/>

- Lett., **24** (1999) 1431-1433.
- 10) J. A. Harrington, R. George, P. Pedersen and E. Mueller: "Hollow polycarbonate waveguides with inner Cu coatings for delivery of terahertz radiation," *Opt. Express*, **12** (2004) 5263-5268.
 - 11) T. Ito, Y. Matsuura, M. Miyagi, H. Minamide and H. Ito: "Flexible terahertz fiber optics with low bend-induced losses," *J. Opt. Soc. Am. B*, **24** (2007) 1230-1235.
 - 12) T. Hidaka, H. Minamide, H. Ito, J. Nishizawa, K. Tamura and S. Ichikawa: "Ferroelectric PVDF cladding terahertz waveguide," *J. Lightwave Technol.*, **23** (2005) 2469-2473.
 - 13) 廣本宣久ら編：テラヘルツ技術総覧 (NGT, 2007) pp. 349-352.
 - 14) M. Miyagi: "Waveguide-loss evaluation in circular hollow waveguides and its ray-optical treatment," *J. Lightwave Technol.*, **LT-3** (1985) 303-307.
 - 15) M. Miyagi and S. Kawakami: "Design theory of dielectric-coated circular metallic waveguides for infrared transmission," *J. Lightwave Technol.*, **LT-2** (1984) 116-126.
 - 16) M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell, S. E. Bell, R. R. Bell, R. W. Alexander, Jr. and C. A. Ward: "Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 1099-1119.
 - 17) M. A. Ordal, R. J. Bell, R. W. Alexander, Jr., L. L. Long and M. R. Querry: "Optical properties of Au, Ni, and Pb at submillimeter wavelengths," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 774-752.
 - 18) C. G. Montgomery, R. H. Dicke and E. M. Purcell eds.: *Principles of Microwave Circuits* (Peter Peregrinus, London, 1987) pp. 56-59.
 - 19) A. W. Snyder and J. D. Love: *Optical Waveguide Theory* (Chapman and Hall, New York, 1983) pp. 542-552.
 - 20) M. A. Ordal, R. J. Bell, R. W. Alexander, Jr., L. A. Newquist and M. R. Querry: "Optical properties of Al, Fe, Ti, Ta, W, and Mo at submillimeter wavelengths," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 1203-1209.
 - 21) Y. S. Jin, G. J. Kim, and S. G. Jeon: "Terahertz dielectric properties of polymers," *J. Korean Phys. Soc.*, **49** (2006) 513-517.
 - 22) W. R. Folks, S. K. Pandey and G. Boreman: "Refractive index at THz frequencies of various plastics," *Optical Terahertz Science and Technology, OSA Technical Digest Series (CD)* (Optical Society of America, 2007) paper MD10.
 - 23) K. Kawase, J. Shikata and H. Ito: "Terahertz wave parametric source," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **35** (2002) R1-R14.

(2008年9月10日受理)