

低損失の広帯域テラヘルツ導波を可能にする空気コア微細構造化ファイバ

ジェッシエンタ・アンソニー、ライナー・レオンハート、セルジオ・レオン・サバル、アレキサンダー・アージロス

籠目構造の空気コア微細構造化プラスチックファイバは低損失と低分散の特性をもつ新しい広帯域テラヘルツ導波路になる。

テラヘルツ分野では導波路によるテラヘルツ放射の導波が最も興味深い研究の1つとして継続されている。テラヘルツ帯域は高透明材料が得られない。このことがテラヘルツ導波路の研究の動機となり、低損失のテラヘルツ伝搬特性に加えて、低い分散特性と高い柔軟性をもつ導波路が探求されている。今までに、サファイアチューブやプラスチックチューブ、さらには金属線や金属板からなる従来型のテラヘルツ導波路が熱心に研究された⁽¹⁾。

一方で、可視から中赤外スペクトル領域のために開発されたフォトニック結晶ファイバ(PCF)の知識と技術をテラヘルツ領域の新しい導波路として利用することも検討された⁽²⁾。なかでも空気コアを用いて光を導波する中空コアPCFは非常に興味深く、無損失伝搬

を非常に低い分散で可能にするテラヘルツ導波路として期待されている。最近、われわれは空気コア「籠目(kagome)」構造のポリメタクリル酸メチル(PMMA) PCFのテラヘルツ導波を試作し、材料損失の20分の1に減少した伝搬損失と低い分散が広い透過領域にわたり得られることを測定した⁽³⁾。「籠目」はPCFに使われるトリヘキサゴナルタイル模様類似したパターンにもとづく名称

われわれが研究した籠目ファイバはPMMAチューブを積層したプリフォームを線引し、積層の中心部から7本のチューブを取り除いて形成した中空コアと三角格子構造のクラッドからなる(図1)。線引したファイバは1.6mm(籠目1)と2.2mm(籠目2)の直径のコアを持ち、それぞれの外径は5mmと

6.8mmになっている。

われわれは標準のテラヘルツタイムドメイン分光装置を使用して、これらのファイバ試料を測定した。この装置は、まずTi:サファイアレーザからの波長800nm、パルス継続時間80fsの光パルスを2本のビームに分離する。ポンプビームは表面エミッタに衝突し、その光整流によってテラヘルツパルスが発生し、プローブビームは光導電アンテナ検出器を光学的に開閉する。この検出器がアンテナに到達したテラヘルツ電場をポンプ-プローブビーム間の遅延時間の関数として直接マッピングする。モード整合を十分に高い結合効率を確保するために、われわれは75mmの焦点距離と0.33の開口数をもつ特製の対称光路テラヘルツレンズを組み入れた⁽⁴⁾。

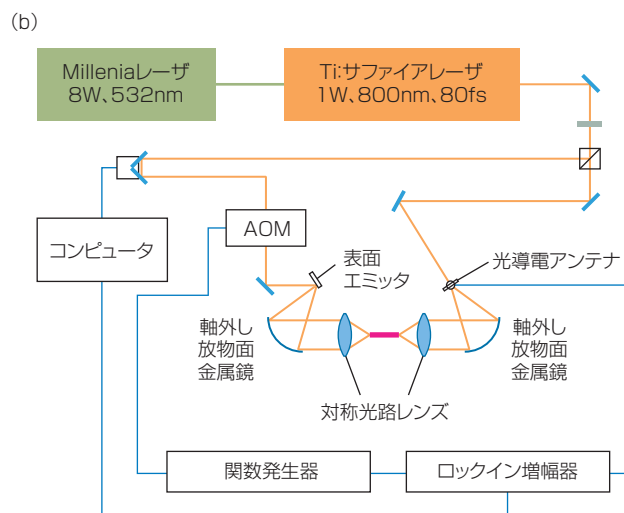
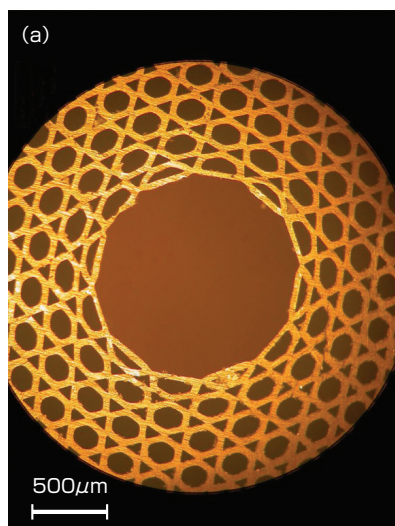


図1 (a)の顕微鏡写真は籠目PMMAファイバの格子構造クラッドと中空コアを示している。(b)のテラヘルツTDS装置は音響光学変調素子(AOM)、2枚の軸外し放物面金属鏡、光導電アンテナ(PCA)および対称透過(S-P)レンズから構成される。この装置は籠目ファイバ(赤紫の部分)の特性評価に使用される。

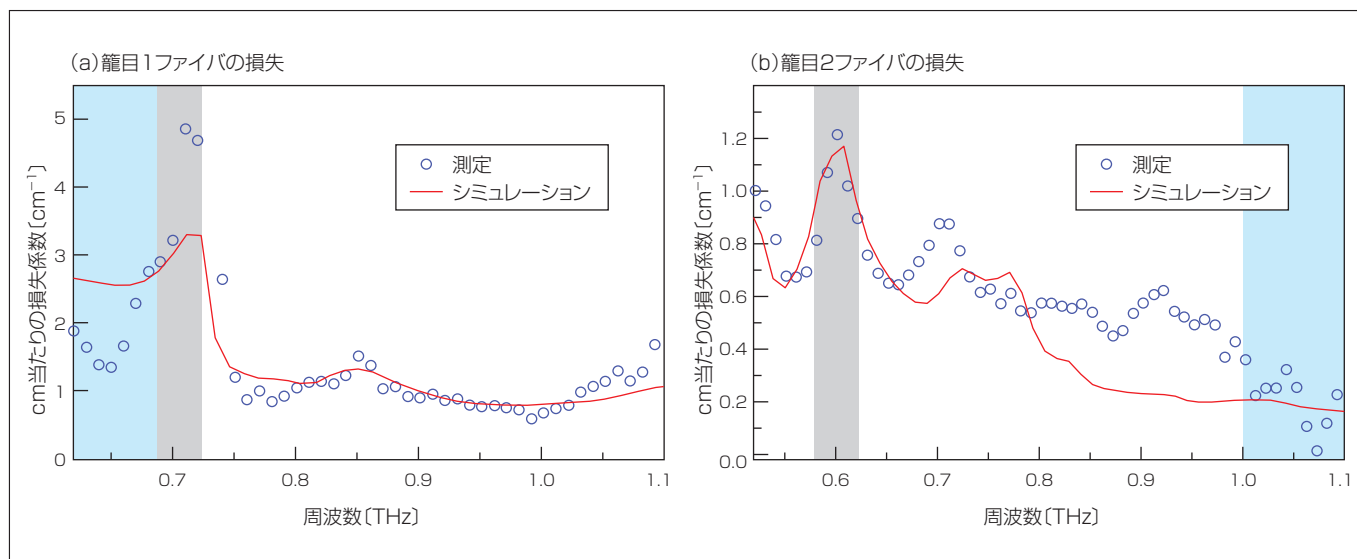


図2 (a)と(b)はそれぞれ籠目1ファイバと籠目2ファイバの損失スペクトルを示している。シミュレーションによると周波数の共鳴は灰色の領域に生じる。信号対雑音比が低いデータが測定された周波数は明るい青色の領域に対応する。測定データとシミュレーション結果の相違は、表面粗さに加えて、ファイバの長さ方向に存在する断面のわずかな不完全性による。

テラヘルツ籠目ファイバの性能

籠目ファイバの基礎となる導波機構は、光の閉じ込めをフォトニックバンドギャップに依存せず(クラッド構造においてフォトニックバンドギャップ状態が欠如)、その代わりに、コアの導波モードとクラッドモードとの相互作用が減少して結合が阻止される機構を利用する^{(5)、(6)}。後者のモードはクラッドの誘電体支持柱が担持するモードに起源がある。これらのモードが共鳴すると、モード間には強いパワー結合が起こる。しかし、共鳴のない周波数ではコアモードとクラッドモードとの物理的重なりが最小になり、コアモードは低い漏れ状態(低損失)の伝搬が維持される。

ファイバの有無に対応する信号の時間変化のフーリエ変換を計算し、両者を比較して、ファイバの導波モードの減衰係数と位相屈折率を導いた。図2は長さを変えて平均化したファイバのパワー損失係数を示している。われわれはスペクトルの特定周波数に現れる明瞭な損失ピークがクラッドモードの

共振周波数(図の灰色の部分)に対応すると同定した。

われわれは共振周波数を測定し、基本モードがクラッド内部で消失せずに漏れることを見いだした。損失係数は籠目1ファイバが0.75~1.1THzの透過波長窓において約 1cm^{-1} (4.3dB cm^{-1})、籠目2ファイバが0.65~1.0THzの透過波長窓において 0.6cm^{-1} 以下(<2.6dB cm^{-1})であった。籠目1ファイバのデータは有限要素周波数ドメイン法を用いたシミュレーション結果と極めてよく一致し、籠目2ファイバのデータもよく一致した。これらの測定にもとづいて、われわれは対称光路テラヘルツレンズを用いた場合の結合係数が60%の高い値になると推定した。

大きいファイバの低い損失

両者の損失係数を比較すると、籠目2ファイバは籠目1ファイバよりも38%低い損失を実現しているが、これは籠目2ファイバのコアサイズが大きいことによる。コアが大きいファイバはコアモードの中心からクラッド壁までの

距離が大きくなるので、モードの空間的重なり範囲が狭くなる。コアが十分に大きいと、材料損失は無視できるほど小さくなり、低損失材料を用いることの必要性も排除される。このことを籠目2ファイバと同じ構造をもつファイバのシミュレーションで検証し、ファイバの材料損失はPMMAバルクの60分の1になり、シミュレーションにより得られた損失係数はPMMAファイバの値にほぼ等しいことを明らかにした。

図3は求めた位相を詳しく計算し、位相の 2π 曖昧さを調整したファイバモードの位相屈折率を示している。共鳴状態(図の灰色部分)にあるモードの位相屈折率の激しい変化はデータ雑音ではなく、コアモードとクラッドモードとの位相不整合の限界と交差の回避によると考えられる。高い損失の外側はコアモードが空気の場合に近い有効位相屈折率で伝搬するが、このことはシミュレーション結果とよく一致する。

広帯域パルス伝搬システムの場合、籠目ファイバを伝搬する群速度分

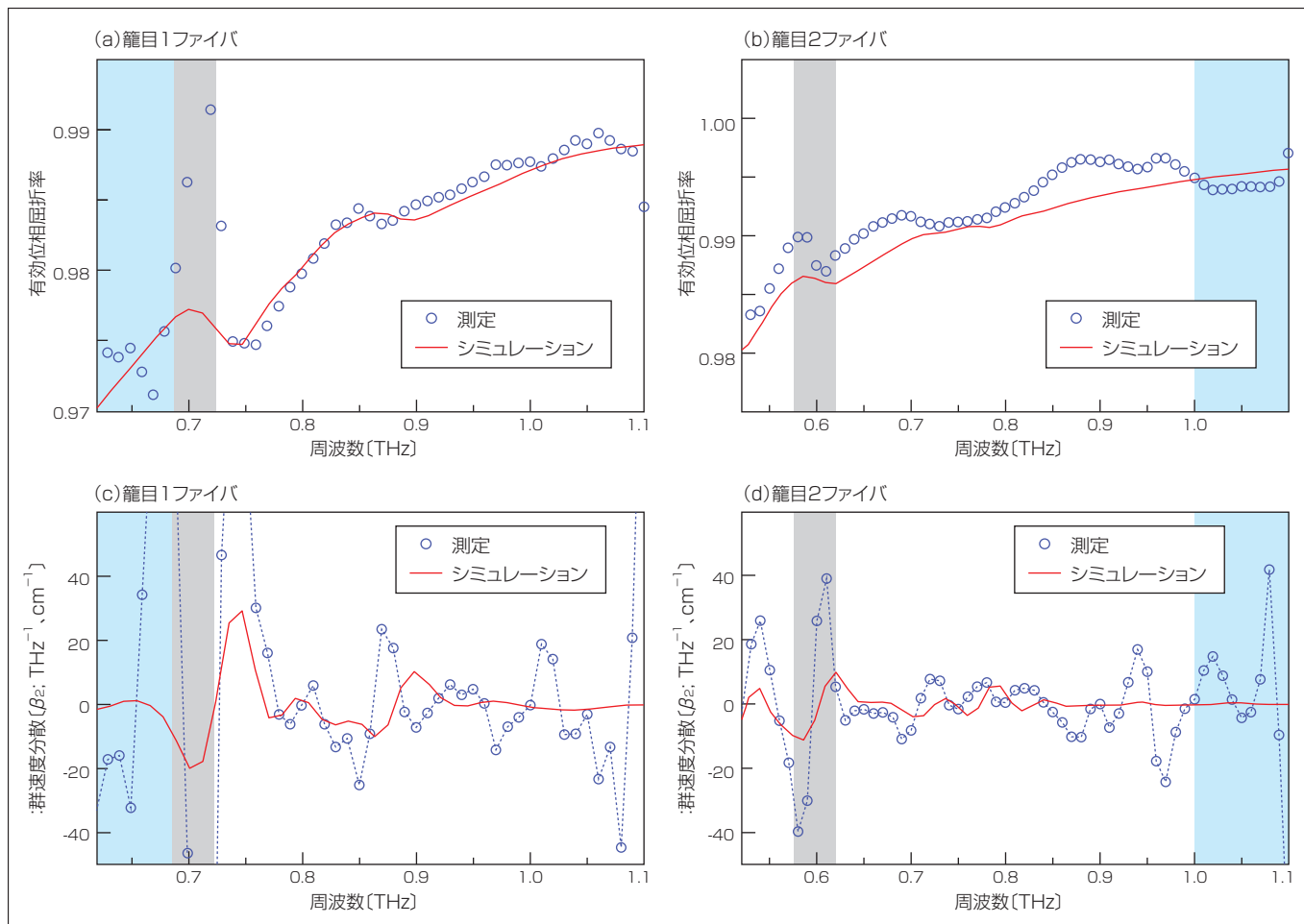


図3 (a)と(b)は籠目ファイバのモード位相屈折率、(c)と(d)は籠目ファイバの群速度分散を示している。シミュレーションによると、灰色の部分は周波数が共鳴して損失が高くなる。明るい青色の部分は測定した信号対雑音比の低い周波数領域に対応する。

散 (GVD) の評価が重要になる。GVD パラメータは伝搬距離によるパルス広がり の尺度であり、 $\delta^2\beta/\delta\omega^2$ で表される。ここで、 β は $n\omega/c$ に関係する伝搬定数 (n は有効モード位相屈折率； ω は角周波数； c は光速) を示している。

図3に示すように、実験により評価した GVD パラメータは信号対雑音比が大きい領域のシミュレーションから求めた GVD 値によるパターンと一致した。データ点の大きな変動、とくに高周波数における変動は、位相屈折率の関数の二次微分から生じた雑音の増幅による。全体として、二種類の籠目ファイバの GVD をシミュレーションした結果、固体コア PCF の分散に匹敵する

非常に低い分散が広いスペクトル帯域にわたり実現されることが分かった⁽⁷⁾。

これらの低損失と低分散を両立した籠目テラヘルツファイバは、広帯域テラヘルツ導波ばかりでなく、ファイバ

構造の内部に蒸着した薄膜によるテラヘルツセンシングやファイバコア内部のガスとプラズマによるテラヘルツ光-物質相互作用の研究などにもニッチな用途を見いだすであろう。

参考文献

- (1) K. Wang and D.M. Mittleman, Nature, 432, 7015, 376(2004).
- (2) P. Russel, Science, 299, 5605, 358(2003).
- (3) J. Anthony et al., Opt. Exp., 19, 19, 18470(2011).
- (4) Y.H. Lo and R. Leonhardt, Opt. Exp., 16, 20, 5991(2008).
- (5) F. Couny et al., Science, 318, 5853, 1118(2007).
- (6) A. Argyros et al., Opt. Exp., 15, 12, 7713(2007).
- (7) J. Anthony et al., JOSA B, 28, 5, 1013(2011).

著者紹介

ジェッシエンタ・アンソニー (Jessienta Anthony) とライナー・レオンハート (Rainer Leonhardt) はニュージーランドのオークランド大学 (University of Auckland) 物理学科に所属; e-mail: jant012@aucklanduni.ac.nz. セルジオ・レオン・サバル (Sergio Leon-Saval) とアレキサンダー・アージロス (Alexander Argyros) はオーストラリアのシドニー大学 (University of Sydney) 物理学部フォトニクス-光科学研究所 (IPOS) に所属。