

1. 研究の目的

本研究では、テルライト、カルコゲナイド、フッ化物ガラスをコアとする新規構造の光導波路素子を開発し、これまでに例のない可視域から 20 μm の中赤外域に亘るコヒーレント光源 (SC 光源: スーパーコンティニューム光源) の実現を目指す。また非線形ガラス素材を用いた非線形光学特性を利用した広帯域コヒーレント光発生限界を見極める。本研究を通して、高非線形導波路素材による高効率光機能素子設計論を構築し、広い分野への応用研究が展開できるよう礎を築く。可視域では光と物質との相互作用が強くなり、これを利用して 3 次元の光メモリー、多光子顕微鏡、レーザー顕微鏡などの応用分野があり、実用的 SC 光源の開発が望まれている。また、中赤外帯には、CO、CO₂ や NO_x あるいは炭化水素系のガス等の様々なガスの基本吸収が存在するため、ppb レベルの超高感度ガス検出に基づく環境・医療・熱科学など広い分野への応用が期待される。中赤外域での任意の波長で使える広帯域光源が開発されれば、環境センシング分野に大きな利便をもたらす。また、ガン細胞の識別や器官細胞の検出、さらには、より深度のある観測可能な脳機能図を描ける光トポグラフィーの開発も可能になり、これまで不可能であった脳深部の診断も可能になる。さらに、本研究の成果は、超高速・全光パケット処理の構築、および未使用波長帯を利用したペタビット級の超高速光情報伝達技術の構築に必要な光信号処理が実現できるフォトニクス素子の開発への寄与や超精度な光周波数や長さ測定、光シンセサイザ実現等のフォトニックセンシング技術などの光計測分野への応用も考えられる。

2. 研究の内容(手法, 経過, 評価など.)

(1) 遅延ラマン応答特性の解明

SC 光は非線形導波路に入射された短パルス光が導波路内の自己位相変調, 相互位相変調, 四光波混合, 誘導ラマン散乱による Soliton Self Frequency Shift (SSFS) およびそれに伴う Dispersive Wave (DW) 発生等の非線形光学効果によって生じ, “白色レーザー”とも呼ばれる広帯域なコヒーレント光である。

長波長域への SC の拡張には SSFS が主要な役割を果たす。その結果, 高非線形ファイバ中での光パルスの非線形シュレディンガー方程式による伝搬解析には, 微細構造光ファイバ(MOF: Microstructured Optical Fiber)媒体の遅延ラマン応答特性の理解が不可欠となる。石英ファイバでは, ラマン利得スペクトルが一つのローレンツ関数で近似できるため単一の減衰振動で表わされることが知られている。しかし, テルライトガラス等の多成分ガラスでは, ラマン利得が多くのモードよりなっているためひとつのローレンツ関数で近似することはできない。各モードの寄与を考慮する必要がある。

図1は, テルライトファイバの遅延ラマン応答であり, 各ラマンモードによる遅延の総和で表わされることを明らかにした。また, 得られたラマン応答を使いテルライト MOF 中の SSFS を再現でき, テルライトファイバ中の光パルス伝搬を解析できることを明らかにした。また, カルコゲナイドファイバやフッ化物ファイバの遅延ラマン応答も明らかにした。その結果, これら素材の非線形導波路中での非線形シュレディンガー方程式による短パルス光の伝搬解析を可能にした。

図3は, 図2のラマン利得スペクトルより得た各種テルライト MOF 中の SSFS を石英ファイバと比較したものである。ガラス組成によりシフト量に大きな違いが表れる。これは, ラマン利得スペクトルの違いによるものであり, ラマン利得スペクトルを制御することにより, SSFS を大きく増大できることがわかる。特にファイバ素材として実績のある TBZN 等では, 石英ファイバと比較してほぼ2倍のシフト量があり, 広帯域 SC 光発生に有効であると言える。また, フッ化物ファイバにおいても石英ファイバに比較して大きな SSFS が得られ, SC 光が紫外から 8 μm に及ぶ中赤外域に発生できることを明らかにした。

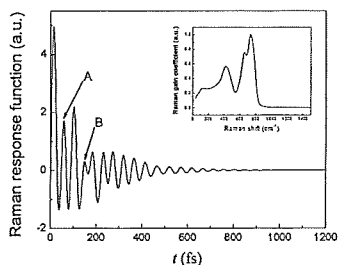


図 1. テルライトガラスの遅延ラマン応答

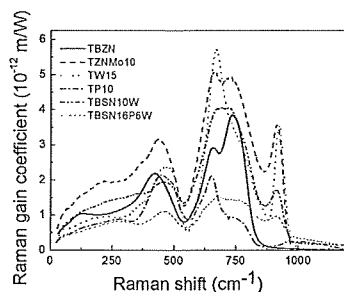


図 2. テルライトガラスのラマン利得

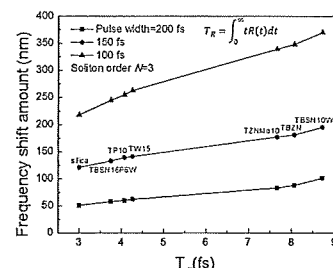
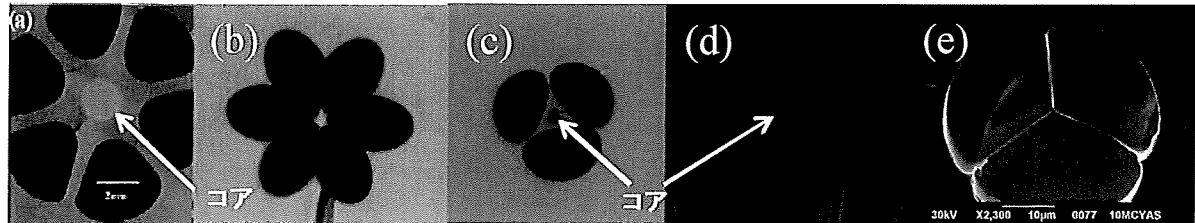


図 3. テルライト MOF の SSFS 特性

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

(2) 微細構造光ファイバの実現

ロンドインチューブ法とスタッキング法を組み合わせた独自の MOF 作製法を開発し、また、新規ガラス素材も開発しコアとクラッドの組成の異なる、たとえば、テルライトガラスコア/フォスフェイトガラスクラッド、カルコゲナイドガラスコア/テルライトガラスクラッド等のハイブリッド微細構造光ファイバを世界に先駆けて実現した。この構造の微細構造光ファイバにより、広帯域 SC 発生に必要な波長分散制御自由度の向上を可能にした。図4に実現した微細構造光ファイバの構造例を示す。



テルライトコア・クラッドハイブリッド MOF

テルライト MOF

カルコゲナイドコア・テルライトクラッドハイブリッド MOF

カルコゲナイドコア・クラッドハイブリッド MOF

テルライトサスペンデッドコアテルライトナノファイバ (コアは 100nm まで細径化可能)

図 4. 高非線形フォトニック結晶ファイバおよびナノファイバ

(3) SC 光スペクトル特性

・ テルライト MOF による SC 光発生

図5にテルライト MOF の SC 光スペクトルを示す。ファイバ径を長手方向で変化させ波長分散を変化させた所謂テーパMOF としてのスペクトルとを比較した。励起波長は $1.56 \mu\text{m}$ であり、パルス幅は 400fsec である。図中の数値は、パルスのピークパワーである。テーパ構造を取ることで、図4のように波長分散が変化すると発生した光波間で位相整合が満たされやすくなり、四光波混合が起きやすくなる。その結果、SC 光スペクトルが広がりやすくなる。テーパ化前の MOF では、SC 光は 1200 から 2800nm で発生しているが、テーパ化後では SC 光は 600 から 2800nm の 2 オクターブ以上にも亘っている。テーパ化により SC 光が格段に広がるのが分かる。図中の写真は、出射光を示すものであり、可視光が発生していることが分かる。テルライト MOF による可視から中赤外域亘る平坦化された SC 発生が観測されたのは初めてである。

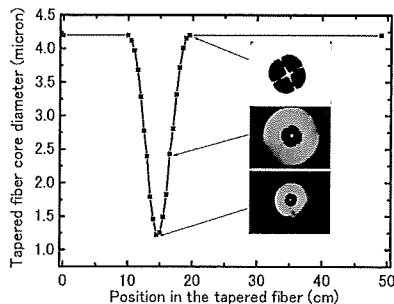


図 4. テーパーテルライト MOF の構造

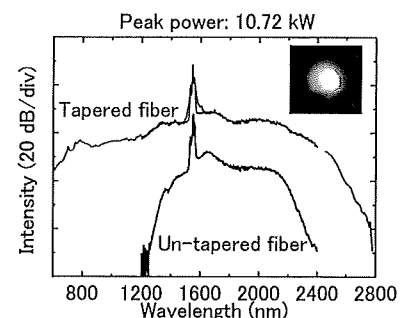


図 5. テルライト MOF の SC 光スペクトル

・ カルコゲナイド MOF による SC 光発生

図 6, 7 および 8 に作製したカルコゲナイド (As_2S_5) MOF の断面写真、波長分散および SC スペクトルを示す。カルコゲナイドガラス (As_2S_5) の零分散波長は $3 \mu\text{m}$ 以上の波長域にある。 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の近赤外域で励起するとカルコゲナイドがイバの吸収損失の高い可視域に THG (Third Harmonic Generation) が発生して、カルコゲナイド MOF の損失を急激に上昇させることを見出した。そのため、零分散波長を $2 \mu\text{m}$ 以上の波長に設定し、より長波長に励起波長を設定し、THG が発生しても吸収損失の低い波長域に発生させ、光劣化の生じることを抑えることとした。そこで零分散波長を $2.2 \mu\text{m}$ に設定した。図 8 から分かるように $2 \mu\text{m}$ の励

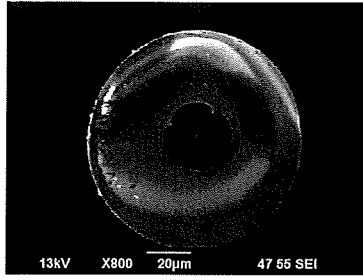


図6. As_2S_5 カルコゲナイドMOFの断面写真

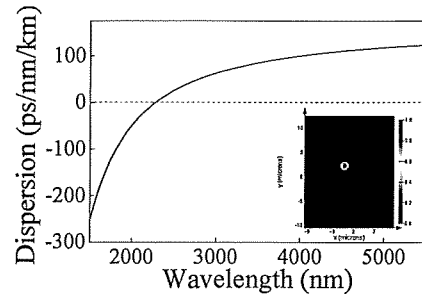


図7. As_2S_5 カルコゲナイドMOFの波長分散特性

起ではSCの拡張は見られないものの、 $2.3\mu m$ の励起では 1.37 から $5.65\mu m$ に亘るSC光の発生を確認することができた。また、光劣化による損失の急激な増加も抑制できた。今回確認できたSCは、カルコゲナイドMOFでこれまで観測されたもののなかで最も広帯域なものである。

・ ファイラメンテーションによるSC光発生

透明媒質中に高強度の短パルス光を入射すると光カー効果による光の集束現象とプラズマ発生により屈折率低下による光ビームの発散効果がつりあい、自己導波路形成(所謂ファイラメンテーション)が起こることが知られている。この現象を利用すると導波路を人工的に形成することがなしにその素材のSC光発生媒質としての極限特性を検証できることが考えられる。図9にテルライトガラス、フッ化物ガラスおよびカルコゲナイドの光透過スペクトルを示す。テルライトガラスは 0.4 から $6\mu m$ に亘り透明であり、フッ化物ガラスは 0.2 から $8\mu m$ に亘り透明であることが分かる。この透過域全体に亘りSCを現実に発生できるかが課題である。ファイラメンテーションを利用したSCの発生を検討した。ガラス素材としてはフッ化物ガラスおよびテルライトガラスを用いた。波長 $1.6\mu m$ 、パルス幅 180fsec 、繰り替え周波数 1kHz のパルスを入射させた。その結果、テルライトガラスの場合、 $0.6\mu m$ から $6\mu m$ に亘るSC光の発生を確認することができた。また、フッ化物ガラスでは、 $0.2\mu m$ から $6\mu m$ に亘る5オクターブ以上のSC光の発生を確認することができた。3dB帯域は $1.15\text{--}4.76\mu m$ であり、20dB帯域は $0.39\text{--}7.4\mu m$ であった。

このようにテルライトでは赤外吸収端におよぶSCが発生し、フッ化物ガラスでは紫外吸収端から赤外吸収端に亘るSCが発生することが確認できた。光透過域全体でSCが発生し得ることを確認できたことは初めてである。励起パルスのSC光への変換効率はテルライトガラスでは90%以上、フッ化物ガラスでは約70%であった。

以上のように、テルライトガラスでは、赤外吸収端まで、フッ化物ガラスでは透過域全体に亘ってSCを発生させ得ることを明らかにし、広帯域SC発生に有効であることを初めて実証した。

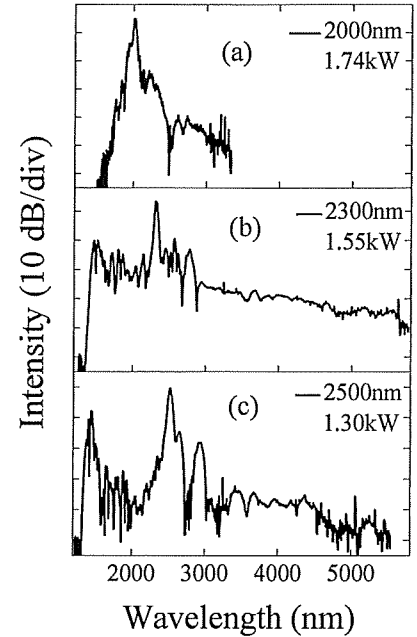


図8. カルコゲナイドMOFのSC光スペクトル

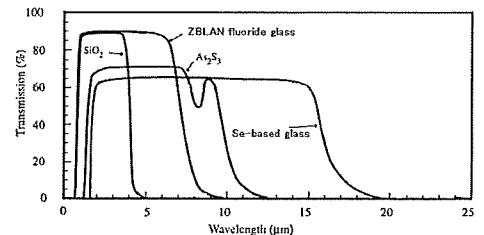


図9. 各種ガラス光透過スペクトル
 SiO_2 : 石英ガラス, ZBLAN: フッ化物ガラス, As_2S_3 , Se-based glass: カルコゲナイドガラス

3. 研究の結論, 今後の課題

石英ガラスより非線形性の高く, また, 光透過域の広いテルライトガラス, カルコゲナイドガラスやフッ化物ガラスをファイバ素材として広帯域 SC の発生を検討した. その結果以下の結論を得た.

- (1) テルライト, カルコゲナイドおよびフッ化物ガラスの遅延ラマン応答を初めて明らかに, それ等の素材中の光パルスの伝搬シミュレーションを可能とした.
- (2) フィラメンテーションを利用し高強度短パルスによるテルライトガラスおよびフッ化物ガラス中の SC 発生を行ったところそれぞれの赤外吸収端の波長まで SC の発生を確認することができた. これはシミュレーションによる予測とも一致した. 特にフッ化物ガラスでは, その光透過域である 0.2 から 8 μm の全域に亘り SC が発生できることを世界で初めて実証した. これらの結果は, 赤外透過特性の優れた素材を導波路素材として使用することにより赤外吸収端に達する中赤外 SC を発生させることが可能であることを示すものである.
- (3) 高効率 SC 発生のためのテルライトガラスおよびカルコゲナイドガラスを用いた微細構造光ファイバ作製技術を確立した. テルライト微細構造光ファイバで 2.8 μm , カルコゲナイド微細構造光ファイバで 5.65 μm におよぶ SC の発生に成功した. さらに異なったコア・クラッド素材からなるハイブリッド微細構造光ファイバを実現し, 波長分散の制御性を向上させることに成功した. これにより今後 SC 発生の高効率化が可能になった.
- (4) 微細構造光ファイバ中の SC の長波長域への成長を妨げている要因として OH 基等の不純物吸収がある. さらなる微細構造光ファイバ中の SC スペクトルの拡張には不純物吸収の低減が必要であり, 今後の課題である. また, 波長分散の制御を駆使して四光波混合, 長波長域での分散波の発生等を利用することが不純物吸収の影響を回避する手段として考えられる. これら手法も含め, 長波長域への SC 拡張を検討していく.

4 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

1. 社会的価値

中赤外帯には、様々なガスの基本吸収が存在するため、ppbレベルの超高感度ガス検出に基づく環境・医療・熱科学など広い分野への応用が期待される。2.5 μm 以上の中赤外領域では、CO、CO₂やNO_xあるいは炭化水素系のガスの固有吸収が存在し、中赤外域での任意の波長で使える広帯域光源が開発されれば、環境センシング分野に大きな利便をもたらす。また、ガン細胞の識別や器官細胞の検出、さらには、より深度のある観測可能な脳機能図を描ける光トポグラフィーの開発も可能になり、これまで不可能であった脳深部の診断も可能になる。本研究の成果は、高効率広帯域波長変換、光スイッチ、再生中継等への応用も可能であるため、超高速・全光パケット処理の構築、および未使用波長帯を利用したペタビット級の超高速光情報伝達技術の構築に必要な光信号処理が実現できるフォトニクス素子の開発にも寄与できる。さらに、超精度な光周波数や長さ測定、光シンセサイザ実現等のフォトニックセンシング技術などの光計測分野への応用も考えられる。本研究成果は、このように計測、医療および超高速通信のための光信号処理への応用にも展開でき、それら分野の革新的発展に貢献することができる。

2. 学術的価値

もしコヒーレント光の発生が任意の波長で可能になれば、上記したように我々に多くの利便をもたらす。しかし、その発生は未だ限られた波長に限定されている。コヒーレント光の発生を広げる手法の一つSC光の発生である。これまでに、石英光ファイバを非線形媒体として用い可視域から2 μm におよぶ波長域のコヒーレントな光が得られている。しかし、赤外域への波長域の拡大は困難な状況にある。

テルライトの光透過域は0.4から6 μm 、カルコゲナイドは、短波長域は0.4 μm から長波長域は15 μm から20 μm 、フッ化物ガラスは0.4から8 μm はまで広がる。この透過特性とその高い非線形を利用するとSCによる可視から中赤外域に亘る広帯域コヒーレント光の発生が期待できる。本研究の意義は、第一にこれまで実現させていないコヒーレント光の拡張が実現することを示した。テルライト、カルコゲナイド、フッ化物ガラスを用いることにより可視域および中赤外域でのSC光が生成できることを明らかにし、その発生メカニズムの解析を可能としたことは本分野において大きな学術的価値がある。また、本研究を通して高非線形導波路素材による高効率光機能素子(MOF)を実現し、SC発生に限らず広い非線形応用が展開できる礎を築くことができたと考えている。

3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

1. M. Liao, X. Yan, Z. Duan, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Tellurite Photonic Nanostructured Fiber", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol.29, No. 7, pp. 1018-1025, 2011.
2. G. S. Qin, X. Yan, M. Liao, A. Mori, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Wideband Supercontinuum Generation in Tapered Tellurite Microstructured Fibers", Laser Physics, Vol. 21, No. 6, pp. 1115-1121, 2011.
3. Z. Duan, M. Liao, X. Yan, C. Kito, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Tellurite Composite Microstructured Optical Fibers with Tailored Chromatic Dispersion for Nonlinear Applications", Applied Physics Express, Vol. 4, pp. 072502-1-3, 2011.
4. G.S. Qin, X. Yan, C. Kito, M. Liao, T. Suzuki, A. Mori, and Y. Ohishi, "Widely Tunable Narrowband Soliton Source Generation in Tellurite Microstructured Fibers", Laser Physics, Vol. 21, No. 8, pp. 1404-1409, 2011.
5. M. Liao, X. Yan, W. Gao, Z. Duan, G. Qin, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Five-order SRSs and supercontinuum generation from a tapered tellurite microstructured fiber with longitudinally varying dispersion", Optics Express, Vol. 19, No. 16, 2011.
6. X. Yan, G. Qin, M. Liao, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Transient Raman response effects on the soliton self-frequency shift in tellurite microstructured optical fiber", J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 28, No. 8, pp. 1831-1836, 2011.
7. T. Kohoutek, X. Yan, T. W. Shiosaka, S. N. Yannopoulos, A. Chrissanthopoulos, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Enhanced Raman gain of Ge-Ga-Sb-S chalcogenide glass for highly nonlinear microstructured optical fibers", J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 28, No.9, pp. 2284-2290, 2011.
8. W. Gao, M. Liao, X. Yan, C. Kito, T. Kohoutek, T. Suzuki, M. El-Amraoui, J. C. Jules, G. Gadret, F. Désévéday, F. Smektala, and Y. Ohishi, "Visible Light Generation and Its Influence on Supercontinuum in Chalcogenide As₂S₃ Microstructured Optical Fiber", Appl. Phys. Express, Vol. 4, pp.102601-1-3, 2011.
9. M. Liao, Z. Duan, W. Gao, X. Yan, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Dispersion engineering of tellurite holey fiber with holes formed by two glasses for highly nonlinear applications", Applied Physics B: Lasers and Optics, Vol.15, No. 4, pp. 681-684, 2011.
10. M. Liao, W. Gao, Z. Duan, X. Yan, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Directly draw highly nonlinear tellurite microstructured fiber with diameter varying sharply in a short fiber length", Optics Express, Vol. 20, No. 2, pp. 1141-1150, 2012.
11. X. Yan, C. Kito, S. Miyoshi, M. Liao, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Raman transient response and enhanced soliton self-frequency shift in ZBLAN fiber", J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 29, No. 2, pp. 238-242, 2012.
12. C. Chaudhari, M. Liao, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Chalcogenide Core Tellurite Cladding Composite Microstructured Fiber for Nonlinear Applications", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No. 13, pp. 2069-2076, 2012.
13. H. T. Tong, C. Kito, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Fabrication of highly nonlinear optical fibers with tellurite glass core and phosphate glass cladding", Optical Materials, Vol.34, pp. 1795-1803, 2012.
14. M. Liao, W. Gao, T. Cheng, Z. Duan, X. Xue, H. Kawashima, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Ultrabroad supercontinuum generation through filamentation in tellurite glass", Laser Physics Letters, Vol. 10, No. 3, pp. 036002-1-5, 2013.
15. M. Liao, W. Gao, T. Cheng, X. Xue, Z. Duan, D. Deng, H. Kawashima, T. Suzuki, and Y. Ohishi, "Five-Octave-Spanning Supercontinuum Generation in Fluoride Glass", Applied Physics Express, Vol. 6, No. 3, pp. 032503-1-3, 2013.