

高非線形微細構造光ファイバによる 広帯域スーパーコンティニウム光の発生

豊田工業大学大学院工学科 先端フォトンテクノロジー研究センター

大 石 泰 文

Broadband supercontinuum generation by highly nonlinear microstructured optical fibers

Yasutake Ohishi

Research Center for Advanced Photon Technology
Graduate School of Engineering, Toyota Technological Institute,

1. はじめに

光ファイバ中の非線形散乱過程やパラメトリック過程を用いると波長変換, 光増幅, slow light 生成, 波形整形, 光スイッチング等全光信号処理に必要な光波制御を行うことが可能である。これまで光信号処理は光半導体や石英ファイバを用いて研究がなされてきたが, 実用にはいたっていない。石英ファイバの場合, 課題は効率が非常に低いことである。重金属酸化物ガラスやカルコゲナイドガラスは高い非線形性を持つことが知られており, 非線形導波路素材として応用が期待されてきた。1980年代以降その非線形性が盛んに研究された。高非線形ガラス材料による効率向上の試みが行われたが, 材料特性のみの研究にとどまり, 求める機能が十分実現されていない。高非線形性を持つガラ

ス素材は, 大きな材料分散を持ち通信波長帯で波長分散を零とすることが非常に難しいことが知られている。その特性がパラメトリック過程に必要な位相整合を満たす高非線形ガラス導波路素子実現を困難にしてきた。

微細構造光ファイバ (Microstructured Optical Fiber: MOF) は大きな導波路分散を実現できるため, 材料分散の大きな高非線形ガラス導波路素子の波長分散制御に有効である。テルライトガラス⁽¹⁾は, $0.3\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$, また, カルコゲナイドガラスは $10\mu\text{m}$ から $20\mu\text{m}$ に亘る光透過域を有する。それらの広い光透過域と高い非線形性を利用すれば広帯域スーパーコンティニウム (Supercontinuum: SC) や高効率全光信号処理への展開が期待できる。本稿では, それら高非線形 MOF の SC 光発生応用について述べる。

2. 遅延ラマン応答

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,

〒468-8511 名古屋市天白区久方 2-12-1
TEL 052-809-1860
FAX 052-809-1869
E-mail: ohishi@toyota-ti.ac.jp

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⁽²⁾。

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，MOF 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⁽³⁾。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。特にテルライトファイバのラマン利得スペクトルは，大きく2つのピークに分かれており，また，それらは複数のラマンモードよりなる。したがって，ひとつのローレンツ関数で近似することはできない。

図1は，テルライトファイバのラマン応答であり，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⁽⁴⁾。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⁽⁴⁾。さらに，カルコゲナイドファイバやフッ化物ファイ

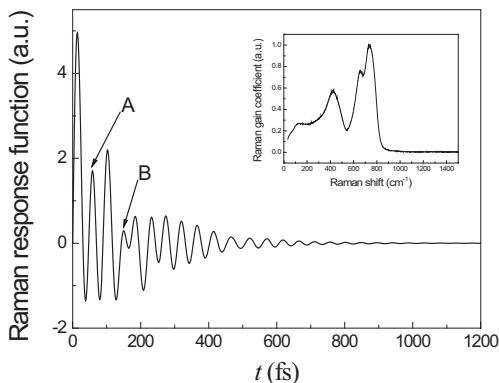


図1. テルライトガラスの遅延ラマン応答

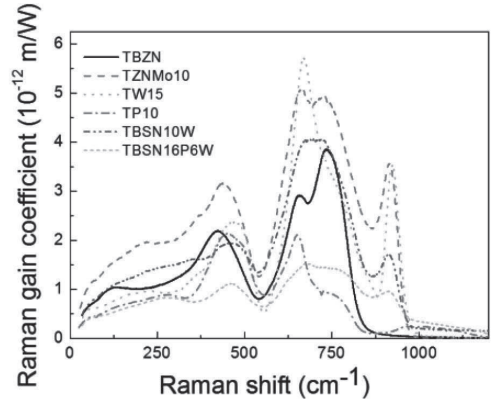


図2. テルライトガラスのラマン利得

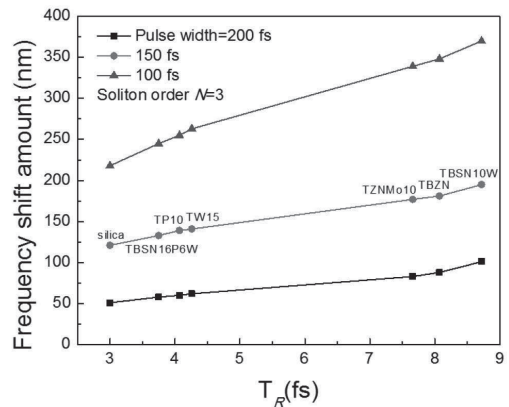


図3. テルライト MOF の SSFS 特性

バの遅延ラマン応答も明らかにした^{(5),(6)}。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および SC 光発生特性解析を可能にした。

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⁽⁴⁾。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⁽⁴⁾。

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 光の拡張に有効であることを明らかにした⁽⁵⁾。

3. スーパーコンティニューム光スペクトル

図 5 にテルライト MOF の SC 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ー MOF としたものとのスペクトルとを比較した。テーパー構造をとることにより、図 4 のように波長分散が変化して発生した光波間で位相整合が満たされるようになり、四光波混合が起きやすくなる結果、SC 光スペクトルが広がりやすくなる。テーパー化前の MOF では、SC 光は 1200 から 2400 nm で発生しているが、テーパー化後では SC 光は

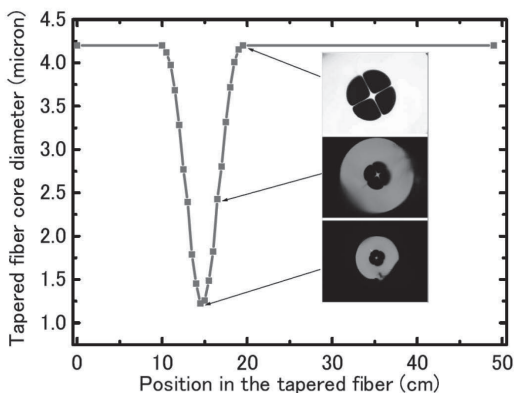


図 4. テーパーテルライト MOF の構造

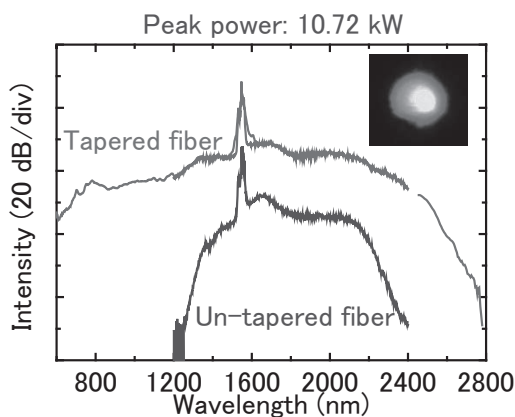


図 5. テルライト MOF の SC スペクトル

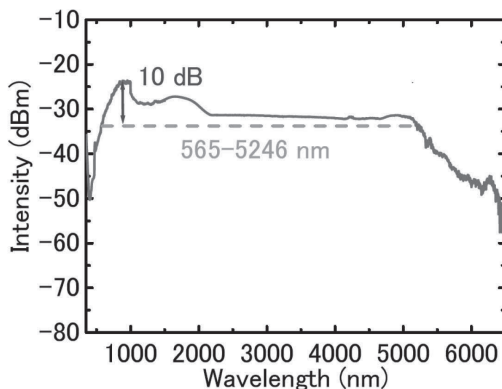


図 6. フッ化物ファイバの SC スペクトル

600 から 2800 nm の 2 オクターブ以上にも亘っている。テーパー化により SC 光が格段に広がること分かる⁽⁷⁾。図中のテルライト MOF からの出射光の写真で示すように可視域の SC 光も発生していることが確認できる。

図 6 にフッ化物光ファイバの SC スペクトルを示す。1.45 μm で励起したとき、350 から 6280 nm に亘る 4 オクターブ以上の広帯域 SC 光を確認した⁽⁸⁾。これは、光ファイバで観測されているもっとも広い SC 光である。

図 7 にカルコゲナイド (As_2S_3) MOF の SC スペクトルを示す。カルコゲナイドガラスの零分散波長は 3 μm 以上の波長域にある。MOF 構造をとることにより、零分散波長を 2.5 μm に移動させた。2.6 μm で励起することにより、4500 nm に及ぶ SC 光の発生を確認することができた⁽⁹⁾。

また、カルコゲナイドガラス素材として As_2S_5 ガラスを用いて SC 光の発生を試みた。このガラスは、 As_2S_3 ガラスより可視光の透過特性が優れており、光劣化しにくい素材として期待している。その結果、1370 から 5650 nm の帯域幅 4280 nm にも広がる SC 光の発生を確認した⁽¹⁰⁾。カルコゲナイド微細構造光ファイバで 5 μm を超えて SC を発生させたのは初めてであり、この SC スペクトルはカルコゲナイド MOF で観測されたものの中で最も広いものである。 As_2S_5 ガラスの透過域は 10 μm にまで及ん

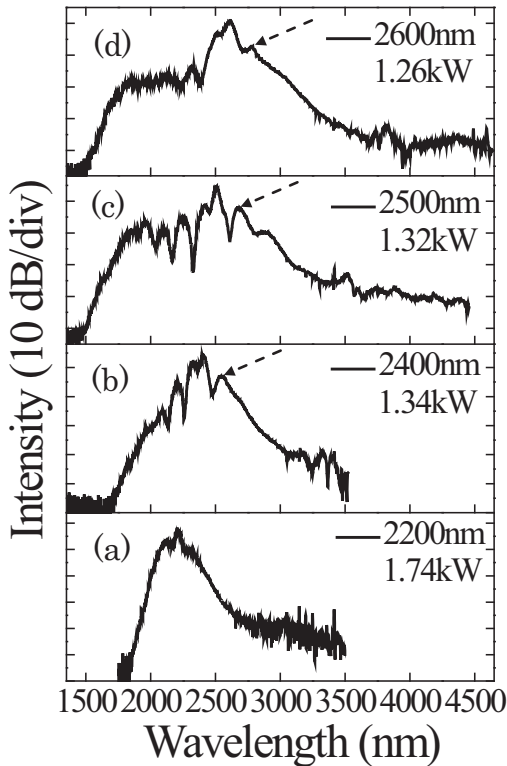


図7. カルコゲナイド MOF の SC スペクトル

でいるので、波長分散制御によりさらなる SC 光の長波長への拡張が期待できる。

4. まとめ

テルライト、カルコゲナイド、フッ化物ファイバの遅延ラマン応答を初めて解明し、これらの非線形導波路中での SC 光の解析を可能とした。また、上記素材を用いて紫外から中赤外域の広帯域 SC 光発生に成功した。

本研究の推進には、文部科学省戦略的研究基盤形成支援事業、科研費基盤研究 (A)、科研費挑戦的萌芽研究、日仏二国間交流事業共同研究 (日本学術振興会・フランス外務省)、日本学術振興会外国人特別研究員制度、愛知県知の拠点事業等の支援を受けた。

<参考文献>

- (1)Y. Ohishi, Eur. J. Glass Sci. Technol. A, 49, 317, 2008.
- (2)R. R. Alfano et al., Phys. Rev. Lett., 24, 592, 1970.
- (3)R. Stone et al., J. Opt. Soc. Am., 6, 1159, 1989.
- (4)X. Yan et al., J. Opt. Soc. Am., 28, 1831, 2011.
- (5)X. Yan et al., J. Opt. Soc. Am., 29, 238, 2012.
- (6)T. Kohoutek et al., J. Opt. Soc. Am., 28, 2284, 2011.
- (7)G. Qin et al., Laser Phys., 21, 1115, 2011.
- (8)G. Qin et al., Appl. Phys. Lett., 95, 161103, 2009.
- (9)W. Gao et al., Opt. Express, 21, 9573, 2013
- (10)W. Gao et al., Appl. Phys. B, in press.