

テーパファイバの非線形増大効果によるスーパーコンティニウムスペクトル発生 Supercontinuum Spectrum Generation by Enhancing Nonlinear Optical Effects in Tapered Fibers

王朝陽 稲垣 克哉 佐藤 信也 今井 正明
Zhaoyang WANG Katsuya INAGAKI Shinya SATO Masaaki IMAI

室蘭工業大学
Muroran Institute of Technology

1.はじめに

スーパーコンティニウム (Supercontinuum: SC) は、高出力の短光パルスが透明な媒質を通過したときに生じる光スペクトルの超広帯域化現象である[1]。1970年代にガラス中において超広帯域光の発生が観測されて以来、光ファイバ、半導体材料、水、希ガスなどの多種多様な物質中での観測が報告されている。光ファイバでは、ファイバの分散値が入射端から出射端にかけて正から負に減少し、且つ波長分散特性が上になる分散フラット/減少ファイバ (Dispersion Flattened/ Decreasing Fiber: DFDF) が上述のスペクトル発生に有効であることが実験と理論により明らかにされた[2-4]。この SC パルスを適当なスペクトル幅で切り出すことにより、そのフーリエ変換によって定まる時間幅を有するパルス列が得られ、波長分割多重(WDM)における多波長パルス光源としての応用が期待されている[5]。最近では、従来の通信用ファイバのクラッド径を数 μm 程度に細くした双方向テーパファイバを使用した SC スペクトル発生の実験結果が報告されている[6]。

本研究では、双方向テーパファイバを用いた SC スペクトル発生について数値解析している[7]。数値解析は高次非線形光学効果(自己急峻化、誘導ラマン散乱)と波長分散特性の高次分散効果(3~5次)を考慮し、伝搬方向変化型スプリット・ステップ・フーリエ(SSF)法を用いた[8]。次にコンティニウム光発生 of 基礎的実験を行い、数値解析結果と比較し検討した[9]。

2.テーパファイバ

テーパファイバは光ファイバのウエスト部におけるクラッド直径を細くしたファイバであり、従来の通信用ファイバを加熱、延伸して作製することができる。テーパファイバのウエスト径を数 μm 程度に極端に細くすると、ファイバ長が10cm程度の長さでも SC スペクトルが発生する利点がある[6,7]。

図1に数値解析に用いたテーパファイバの形状を示す。入射部と出射部の長さが4mm、テーパ遷移部分の長さが12mm、そしてテーパウエ

スト部分の長さが3mmとなっており、全長は35mmである。また、ウエスト径は3 μm である。

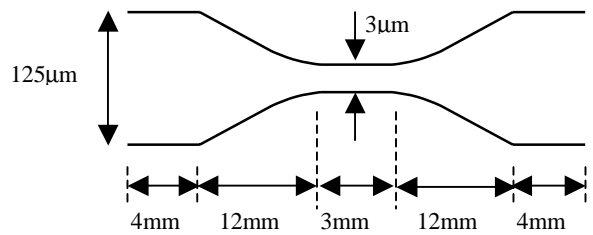


図1 解析に用いたテーパファイバの形状

図2に電界分布より確認した波長0.85 μm での有効コア断面積の変化を示す[10]。ウエスト径を極端に細くすると有効コア断面積が急激に減少し、この減少が自己位相変調(SPM)効果などの非線形効果を増大させることになる。図1、図2より、伝搬距離に対する有効コア断面積の変化は図3のようになる。この図から、テーパウエスト部分に近づくほど有効コア断面積が急峻に変化していることが分かる。テーパファイバによって SC スペクトルがより広がる一つの要因は、このような非線形係数が増大するためである[11]。

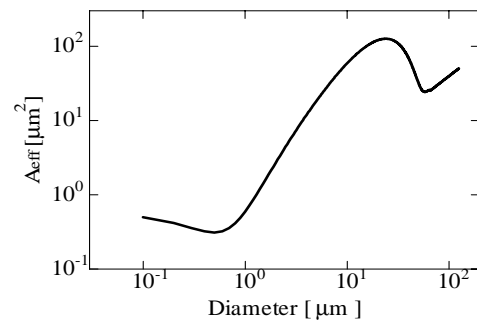


図2 有効コア断面積の変化 (波長 0.85 μm)

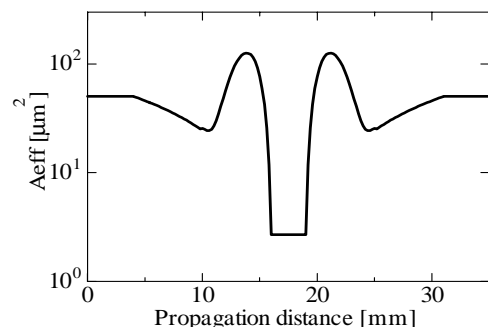


図3 伝搬距離に対する有効コア断面積の変化

図 4 にテーパウエスト径に対する波長分散値の変化を示す[8]。ウエスト径を細くすると波長分散値が急激に増加し、異常分散になる。図 1 のようなテーパファイバの形状から、伝搬距離に対する分散値の変化は図 5 のようになる。図 5 において、正の値 ($D > 0$) が異常分散、負の値 ($D < 0$) が正常分散を表している。異常分散から正常分散に変わる位置 (19mm 地点) でスペクトルが急激に広がり、SC スペクトルとなる。この波長分散の減少 (零分散) がテーパファイバによって SC スペクトルがより広がるもう一つの要因と考えられる[7]。

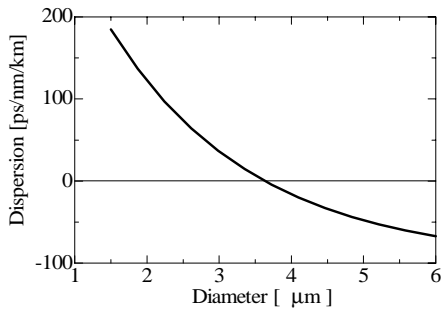


図 4 テーパウエスト径に対する波長分散値の変化 (波長 0.85 μm)

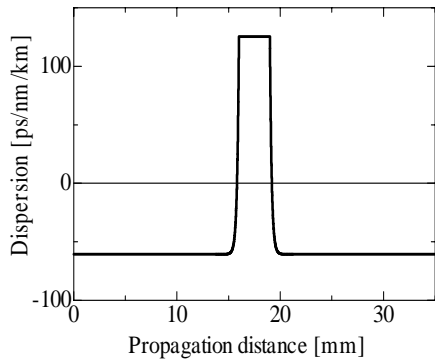


図 5 伝搬距離に対する分散値の変化

3. 数値解析及び実験結果

図 6 にテーパファイバによる SC スペクトル発生の数値解析結果を示す。この図はウエスト径を 3 μm に固定し、入射平均パワーを 100mW ~

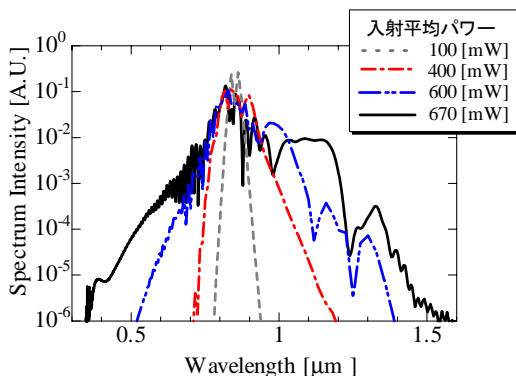


図 6 SC スペクトル発生 (解析結果)

670mW の範囲で変化させた場合の SC スペクトルである。数値解析には入射光としてフェムト秒 Ti:Sapphire レーザを考え、中心波長 0.85 μm 、パルス幅 100fs、繰返し周波数 82MHz とした。図 6 より、入射平均パワーを上げていくことにより広帯域な SC スペクトルが発生することが分かる。

図 7 に実験に用いた測定光学系を示す。入射光には Ar⁺ レーザで励起したフェムト秒 Ti:Sapphire レーザを使用した。中心波長、パルス幅、繰返し周波数はそれぞれ 0.85 μm 、100fs、82MHz であり、数値解析で用いたものと同じ値である。ファイバ長は、入射側のアンテーパ部分が 50cm、出射側のアンテーパ部分が 90cm であり、テーパ部分の形状は数値解析で使用した図 1 のような形状と同じである。

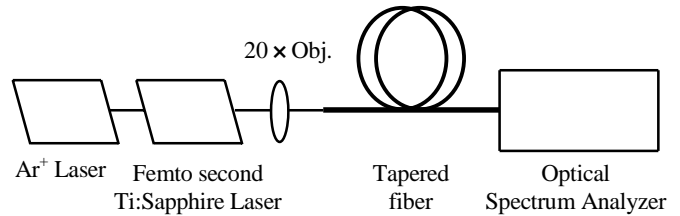


図 7 測定光学系

図 8 にスペクトル強度を規格化した SC スペクトル発生の実験結果を示す。スペクトル強度が 20dB のときのスペクトル幅は、入射スペクトル (破線) が 52nm であり、入射平均パワーが 113mW のときの射出スペクトル (実線) が 106nm であった。入射平均パワーが低く、非線形効果が小さいため、広帯域な SC スペクトルは得られなかったが、入射スペクトルに比べて 50nm 程のスペクトルの広がりが観測できた。

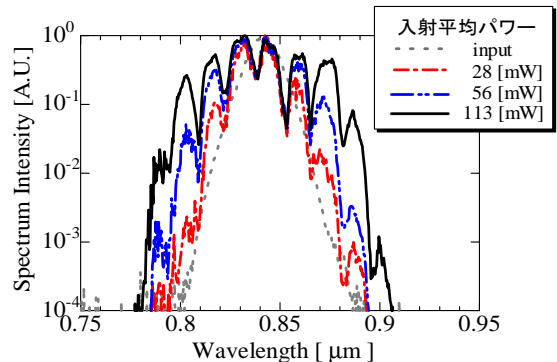


図 8 実験結果

図 9 に解析結果と実験結果の比較図を示す。破線、実線はそれぞれ入射平均パワー 100mW (解析) と 113mW (実験) の場合を拡大して示している。図 9 より、解析結果と実験結果のスペクトル幅

はほぼ一致していることが分かる。しかし、実験では幾つかの小さなピークが観測された。この理由は入射平均パワーが小さい時現われる偏光変調不安定性 (PMI) が影響しているためと考えられる[12]。

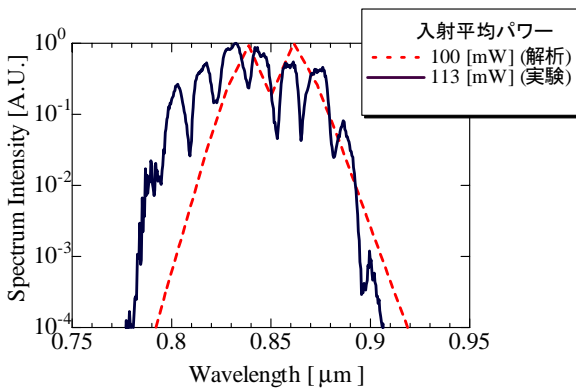


図9 解析結果と実験結果の比較

但し、文献[12]では弱い複屈折ファイバ(モード複屈折 $n=1.9 \times 10^{-6}$)を考えていて、入射直線偏光の複屈折ファイバの2つの主軸(速軸、遅軸)に対する影響について数値解析している。複屈折ファイバでない通常のテーパファイバによる入射パワーが小さい時のSC発生については今後の検討課題である。

4.まとめ

双方向テーパファイバを用いて主に高次非線形光学効果を考慮した伝搬方向変化型SSF法による数値解析を行い、広帯域なSCスペクトルが発生することを確かめた。また、Ti:Sapphireレーザ(中心波長 $0.85\mu\text{m}$ 、パルス幅 100fs、繰返し周波数 82MHz)を用いて実験を行い、入射スペクトルに比べて50nm程のスペクトルの広がりを観測した。実験では入射平均パワーを上げると、非線形増強効果によって、広帯域なSCスペクトルの発生が予測できた。今後は入射光学系の改良を行い、SCスペクトルの発生条件をより詳しく調べる予定である。

参考文献

[1] 森邦彦, “光通信のための白色光源~スーパーコンティニウム光発生のしくみ~, ” 光学, 32 巻 10 号, pp. 633-635 (2003).
 [2] K.Mori, H.Takara, S.Kawanishi, M.Saruwatari, and T.Morioka, “Flatly broadened supercontinuum spectrum generated in a dispersion decreasing fiber with convex dispersion profile,” Electron.Lett., vol.33, no.21, pp.1806-1807(1997).
 [3] T.Okuno, M.Onishi, and M.Nishimura, “Generation of ultra-broad-band supercontinuum by

dispersion-flattened and decreasing fiber,” IEEE Photonics Technol. Lett., vol.10, no.1, pp. 72-74 (1998).
 [4] H.Sone, T. Kawano, M. Imai, and Y. Imai, “Numerical analysis of supercontinuum generation in a dispersion flattened/decreasing fiber,” Proc. of APCC/OECC 1999, pp.357-360 (1999).
 [5] 猿渡正俊, “テラビット光通信と光パルス,” 光学, 32 巻 10 号, pp.588-596 (2003).
 [6] T. A. Birks, W. J. Wadsworth, and P. St. J. Russell, “Supercontinuum generation in tapered fibers,” Opt. Lett., vol. 25, no 19, pp.1415-1417 (2000).
 [7] 今井正明, 曾根宏靖, “分散変化型光ファイバによるスーパーコンティニウムスペクトルパルスの発生,” 第 30 回光波センシング技術研究会講演論文集 LST 30-16, pp. 107-116, (2002).
 [8] 稲垣克哉, 王朝陽, 今井正明, 曾根宏靖, “テーパファイバによるフェムト秒コンティニウム光発生の数値解析と実験,” 信学技報, OCS2003-59, pp. 23-28 (2003).
 [9] 稲垣克哉, 王朝陽, 佐藤信也, 今井正明, “テーパファイバによるフェムト秒コンティニウム光発生,” 平成 15 年電気関係学会北海道支部連大, No.115, pp.146 (2003).
 [10] P. Dumais, F. Gonthier, S. Lacroix, J.Bures, A.Villeneuve, P. G. J. Wigley, and G. I. Stegeman, “Enhanced selfphase modulation in tapered fibers,” Opt. Lett., vol. 18, no 23, pp. 1996-1998 (1993).
 [11] J. Teipel, K. Franke, D. Türke, F. Warken, D. Meiser, M. Leuschner, and H.Giessen, “Characteristics of supercontinuum generation in tapered fibers using femtosecond laser pulses,” Appl. Phys. B77, pp.245-251 (2003).
 [12] S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt, J. D. Harvey, J.C.Knight, W.J.Wadsworth, and P.St. J. Russell, “Supercontinuum generation by stimulated raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fibers,” J. Opt. Soc. Am.B, vol.19, no.4, pp.753-764 (2002).