

重水中テーパーファイバーからのスーパーコンティニューム光パルスのスペクトルと位相の数値解析

— テーパーウエスト長による影響 —

曾根 宏靖*・原田 康浩*・今井 正明**、†・辻 寧 英**・中村 真毅***,****

*北見工業大学工学部 〒090-8507 北見市公園町 165

**室蘭工業大学工学部 〒050-8585 室蘭市水元町 27-1

***茨城大学工学部 〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1

****茨城大学フロンティア応用原子科学研究センター 〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方 162-1

Numerical Analysis of Spectrum and Phase of Supercontinuum Optical Pulses from Tapered Fibers Immersed in Heavy Water: Influence of Tapered Waist Length

Hiroyasu SONE*, Yasuhiro HARADA*, Masaaki IMAI**,†, Yasuhide TSUJI** and Shinki NAKAMURA***,****

*Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami 090-8507

**Faculty of Engineering, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran 050-8585

***Faculty of Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi 316-8511

****Frontier Research Center for Applied Atomic Sciences, Ibaraki University, 162-1 Shirakata, Tokaimura, Ibaraki 319-1106

Highly efficient generation of spectrally-broad single-mode supercontinuum (SC) light in conventional tapered fibers is investigated by many researchers. It has recently been reported that optical pulses propagating through a tapered fiber immersed in heavy-water (D_2O) yield an broad and flat SC spectrum because the dispersion characteristics of the fiber is flattened at zero dispersion around 1064 nm. In the present paper, we analyzed numerically properties of the SC generation for the tapered fiber in D_2O in more detail. The influence of incident light pulse parameters and waist length of a tapered fiber on SC spectra was also examined. From these analyses, it was found that wide SC spectrum with a spectral width of 412 nm measured at 20 dB less than the central maximum intensity was generated from optical pulses with a pulse width of 125 fs and a peak power of 25 kW at central wavelength of 1064 nm due to propagation even in a tapered fiber with a waist length of 10 mm.

Key words: nonlinear fiber optics, supercontinuum generation, tapered fiber, heavy water (D_2O)

1. はじめに

高強度短光パルスが光ファイバーなどの透明媒質中を伝搬するとき発生する超広帯域化の現象は、スーパーコンティニューム (supercontinuum: SC) スペクトル光として知られている¹⁾。これは、光が狭いファイバーコアに閉じ込められるため、実効的な強度密度が高くなり、高次非線形光学効果の複合過程で生じると考えられる。通信波長帯では高密度波長分割多重光源として研究されており²⁾、1.5 μm 波長帯の SC 用ファイバーとしては、波長分散特性

がフラットで長手方向に減少する分散フラット-分散減少ファイバーが数多く検討されてきた³⁻⁸⁾。最近、可視光領域においても、光ファイバーに空孔を導入した新たな構造をもつフォトニック結晶ファイバーが注目され、平坦性にすぐれた SC スペクトルが観測された^{9,10)}。一方、従来の通信用ファイバーの外径を加熱延伸法により極端に細くした双方向テーパーファイバー (tapered fiber) (以下、テーパーファイバーと略す) においても SC 発生が実証された^{11,12)}。テーパーファイバーでは、光強度分布が数 μm 程

E-mail: sonehi@mail.kitami-it.ac.jp

†現住所: 〒063-0037 札幌市西区西野 7-4-4-12

度のクラッド直径以下に閉じ込められ、ゼロ分散波長は従来の通信用の1.3~1.5 μm 帯から可視領域の800 nm帯に移る¹³⁾。そのため、ウエスト部分で、自己位相変調と誘導ラマン散乱などの高次非線形効果が顕著になり、高次分散効果との相互作用が強まる。テーパファイバーにおけるSC発生メカニズムを解明するため、多くの研究グループにより、数値解析が行われ報告されている¹⁴⁻¹⁶⁾。

しかし、これらのSC光の位相は非線形効果に特有な波長依存性を有しているため、そのままではSC光の全波長域を同時に使用することは困難である¹⁷⁾。そのため、これらのSC光を有効利用するためには、その位相情報を詳細に知り制御する必要がある。この位相を制御する一手法として、SC光を空間周波数に分光し、空間位相変調器等を用いて各波長ごとに位相を制御する方法がある^{18,19)}。

最近、テーパファイバーの外周を重水 (D_2O) 中に設置することで、ファイバー断面の実効屈折率を変化させ、波長分散 (GVD) 特性を広帯域で低分散値に制御する方法が報告された²⁰⁾。この分散制御ファイバーを用いて、サブナノ秒パルス入射によるSC光発生実験²¹⁾や応用実験も試みられている²²⁾。このSC光の特筆すべき点は、スペクトルが数百ナノメートルの広帯域にもかかわらず、全帯域間の位相差が比較的小さく抑えられ、入射波長付近を極値として周波数の二次関数に近い特性を有していることである²³⁾。このことは、後段に回折格子対やプリズム対による二次位相媒質を置くことのみで、簡単に位相補償が可能であることを示している。そして、数百ナノメートルにおよぶ広帯域において、位相差の小さい光波を容易に提供可能であることを意味している。また、ウエスト部分はSC光の全波長領域で異常分散の影響を受けないので、発生過程における高次ソリトンによる非線形雑音の影響を避けられる。しかし、これらのSC光の発生過程、パルスやファイバーパラメータの影響、さらに位相制御をするうえで重要な位相の波長依存性について詳細に調査し、報告した例はまだない。

本論文では、これまで行ってきた数値解析法を駆使して、重水中に置いたテーパファイバーによる発生SC光の特徴、SC発生過程、入射パルスパラメータ特性を詳細に調査した。特に、SC発生パルスの制御を行うために必要不可欠な位相の波長依存性についても、SCスペクトル幅と同様に評価した。さらに、位相制御を容易にするための現実的なSC光発生源を目指し、テーパウエスト長の影響についても調べた。

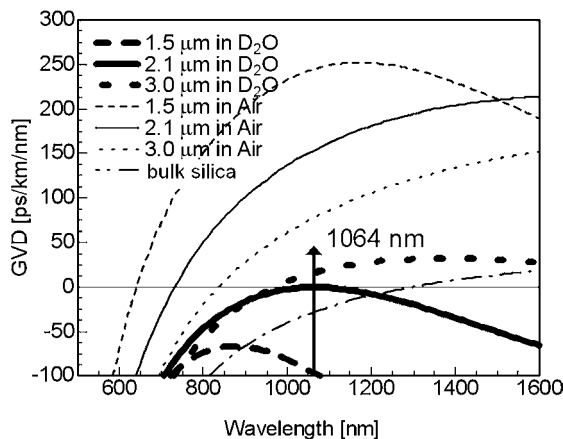


Fig. 1 Calculated GVD curves for waist of tapered fiber immersed in air (light line), heavy water (D_2O) (heavy line) and bulk silica (dash-dot line).

2. テーパファイバーウエスト部の波長分散特性

本解析で用いたテーパファイバーは、通信用シングルモードファイバーのCorning社製SMF-28である。Fig. 1は、周囲が空気や重水である場合、テーパファイバーのウエスト部分のクラッド直径を、1.5 μm (破線), 2.1 μm (実線), 3.0 μm (点線) と変えたときの波長分散特性について計算した結果を示す。太線が重水中に設置した場合、細線が空気中の場合である。比較のため、石英バルクの特性 (一点鎖線) も示した。各曲線は、ウエスト部分断面における空気や重水、クラッド、コアの屈折率分布を考慮し、有限要素法により厳密な電界分布を求めて算出した²⁴⁾。

空気中に設置したテーパファイバーにおいて、ウエスト径が1.5 μm ~3.0 μm の場合 (細線), そのGVD特性は可視波長域でゼロ分散を跨ぐ特性を示す。また、同様なウエスト径でも重水中に設置した場合 (太線) には、そのGVD特性は可視波長域でゼロ分散を跨ぐことはないが、ウエスト径が2.1 μm の場合には、波長1064 nmにおいてゼロ分散でかつ極値を示す。この特性は、過去に1.5 μm 通信波長帯において、ゼロ分散でかつ極値を示すW型屈折率分布の分散フラットファイバー²⁵⁾を用いたSC発生の場合に酷似している。そのようなW型屈折率分布の分散フラットファイバーを用いた場合の発生SC光は、入射中心波長に対して長短波長に対称的に平坦に広がり³⁻⁸⁾、なおかつそのSC光位相の周波数依存性は、入射中心波長付近を極値とする二次関数に近い特性が得られる。このことは、後段に回折格子対²⁶⁾等の簡素な二次位相媒質を置くことのみで、簡単に位相補償が可能であることを示している。また、ウエスト部分は、SC光の全波長領域で異常分散の影響を受けないので、発生過程における高次ソリトンによる非線形雑音の影響を避けられる。

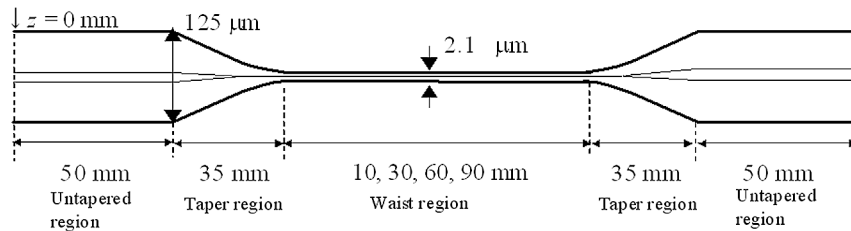


Fig. 2 Schematic structure of a biconical tapered fiber.

3. 解析モデルおよび数値解析法

Fig. 2 に、本論文において仮定したテーパファイバー形状を示す。通常、ファイバー部分は短パルスによる非線形効果を防ぐため、接続に必要な最小限の長さのみにし、前後に 50 mm、ウエスト部分までの遷移部分を前後に 35 mm とした。2.1 μm のウエスト部分の長さは、文献 20~22 で使用されていた 90 mm という数値以外に、容易に製作可能な数値 10 mm, 30 mm, 60 mm の 3 種類を含めて、合計 4 種類について調べた。

また、本論文では、Fig. 1 で示した分散特性を有するテーパファイバー中を、中心波長 $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$ 、パルス幅 $t_p = 125 \text{ fs} \sim 500 \text{ fs}$ 、ピークパワー $P_0 = 2.5 \text{ kW} \sim 50 \text{ kW}$ の sech^2 型フーリエ変換限界の超短光パルスが、重水中に設置した入手容易な双方向テーパファイバー中を伝搬する場合について考える。ファイバー出射光の算出には、文献 27 で用いられた伝搬方向に分散特性が変化する非線形シュレーディンガー方程式を、スプリットステップフーリエ法²⁸⁾を用いて数値解析により求めた。この数値解析法については、文献 24, 27 が詳しいので、ここでは簡単に述べる。これまで、光の伝搬方向に波長分散特性が変化する特殊な分散制御ファイバーにおいて、高次分散効果と高次非線形効果を考慮した変形非線形シュレーディンガー方程式モデルを提案し報告してきた^{6-8, 24, 27)}。特に、ラマン散乱項をローレンツ関数モデルで近似することにより、超広帯域スペクトルパルスによる誘導ラマン散乱の効果を厳密に評価した。さらに、テーパファイバーのクラッド径が軸方向に沿って変化している遷移部分においても、波長分散および有効コア断面積の変化を詳細に評価することにより、位相情報を含めたより正確な解析が可能となった^{24, 27)}。なお、本論文中で用いるパワー P_p とは、入射パルス光のピークパワーを示し、平均パワー [W] / (繰り返し周波数 [Hz] \times パルス幅 t_p [s]) で表される値である。これは例えば、ピークパワー 25 kW、パルス幅 500 fs の解析においては、繰り返し周波数 80 MHz、平均パワー 1 W の結果と、繰り返し周波数 40 MHz、平均パワー 500 mW の結果が等価になる。

4. 重水中テーパファイバー中での SC 発生

重水中に設置したテーパファイバー中での SC 光の発生過程を明らかにするため、ウエスト長が 60 mm の場合限定して調べた。

4.1 SC 発生過程

ウエスト長が 60 mm のとき、超短パルス光を入射した場合の発生 SC 光のスペクトル強度と位相の変化を、伝搬距離に対して調べた結果を Fig. 3 に示す。入射パルスパラメーターは中心波長 1064 nm、パルス幅 500 fs、ピークパワー 25 kW である。調べた地点は、ウエスト部分への遷移部分の開始地点 $z = 50 \text{ mm}$ 、ウエスト開始地点 $z = 85 \text{ mm}$ 、ウエスト部分の終了地点 $z = 145 \text{ mm}$ 、通常ファイバーへの遷移部分の終了地点 $z = 180 \text{ mm}$ 、および、ファイバー出射地点 $z = 230 \text{ mm}$ である。ここで、位相は、中心波長を基準としてアンラッピング処理を施し、スペクトル強度が最大値の 10^{-3} 以上の範囲のみに限定して示している。図中の ϕ_{max} は、中心波長付近の最小位相値との位相差の最大の値を意味する。Fig. 3 から、最初の通常ファイバー部分通過後の 50 mm の地点や遷移部分通過後の 85 mm の地点では、ほとんどスペクトルは広がらないが、ウエスト部分通過後の 145 mm の地点では広いスペクトルが得られている。また、後半の遷移部分通過後の 180 mm の地点や通常ファイバー部分を通過したファイバー出射地点 230 mm では、スペクトル形状に若干の変化は生じるが、幅はあまり広がらない。ただし、最大位相差 ϕ_{max} は大きく増加している。これは、遷移部分の伝搬距離 160 mm あたりからは、分散値が正常分散値になるため、伝搬とともに常に積算されることによると考えられる。また、Fig. 3 の $z = 180 \text{ mm}$ と 230 mm の $\phi(\lambda)$ について、ウエスト部分の波長分散特性が入射波長を中心にほぼ対称な特性を示すため、この効果を受けた SC 光の位相 $\phi(f)$ (周波数の関数に置き換え) と周波数の二次関数が重なるかどうかを詳しく調べた。その結果、SC 光の位相 $\phi(f)$ は今回のパラメーターでは、ウエスト部分の終了地点 ($z = 180 \text{ mm}$) だけでなく、出射部分においてもおおむね周波数の二次関数に近い特性を示すことが確認された。このことは、後段に回折格子

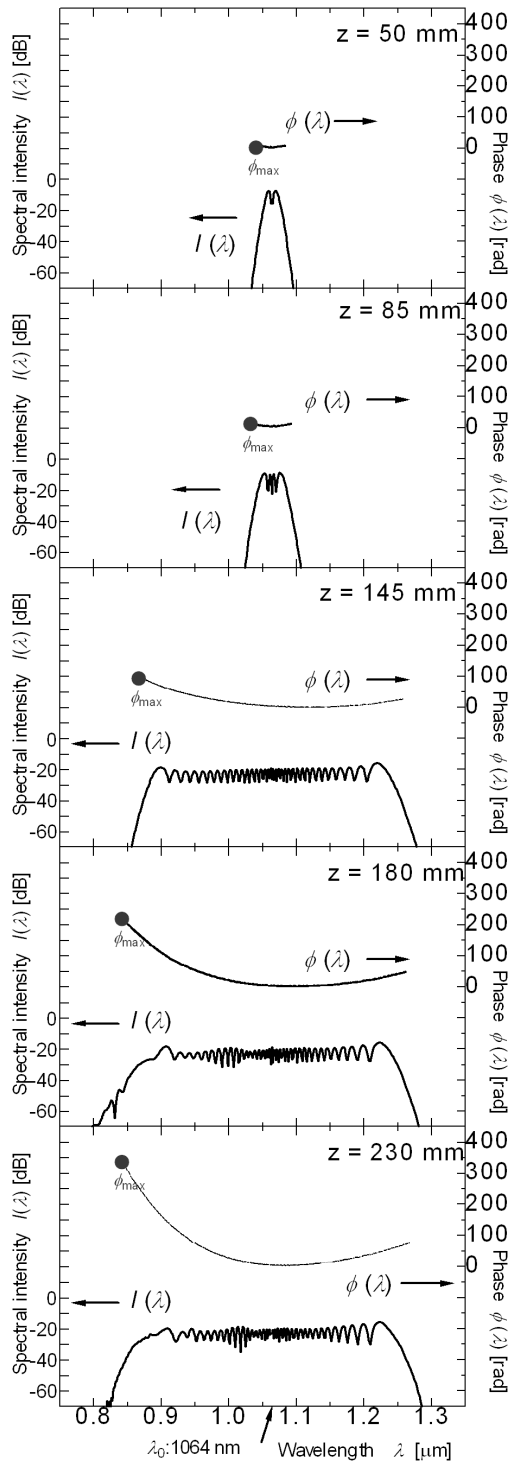


Fig. 3 Evolution of the spectral intensity $I(\lambda)$ and unwrapped spectral phase $\phi(\lambda)$ along the whole region of the tapered fiber.

対²⁶⁾等の簡素な二次位相媒質を置くことのみにより、簡単に位相補償が可能であることを示している。その後さらに詳細に補償する場合、SC光を空間周波数に分光し、液晶空間位相変調器を用いて各周波数ごとに位相を制御する方法がある^{18,19)}。このとき、スペクトル間の位相の最大値

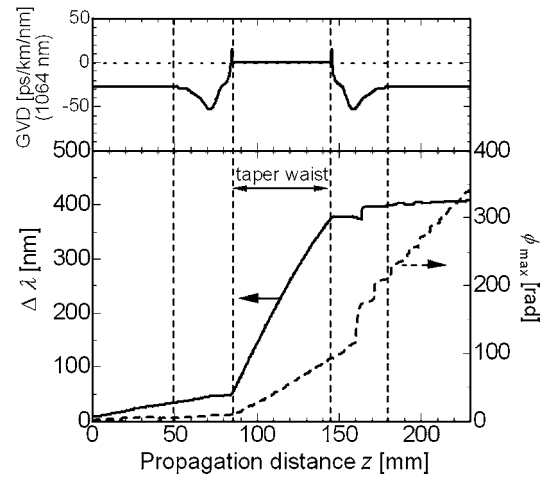


Fig. 4 Evolution of the GVD at 1064 nm, spectral width $\Delta\lambda$ and maximum phase value ϕ_{\max} as a function of the propagation distance z .

と最小値の差である最大位相差が大きくなると、各画素間の位相変化量が急勾配になり、補償しにくいという問題が生じる²⁹⁾。次節以降に、位相の状態を表すひとつの指標として、最大位相差についても議論する。

4.2 スペクトル幅と最大位相差

次に、スペクトル強度が最大値の -20 dBとなる点で測ったスペクトル幅 $\Delta\lambda$ とスペクトル間の位相の最大値と最小値の差である最大位相差 ϕ_{\max} が、1064 nmでの分散値の長手方向の変化、伝搬距離 z に対してどのように変化するかをFig. 4に示す。 $\Delta\lambda$ の結果より、SC光のスペクトルの広がりはおもにウエスト部分に入ってから生じる。これは、光路の断面積減少に伴うパワー密度の増大とともに、ゼロ分散のために非線形効果が大きくなることによるものである。そして、ウエスト部を通過直後は、ほぼ一定値に取まることがわかる。一方、SC中のスペクトル間の最大位相差 ϕ_{\max} は、ウエスト部分に入るとスペクトル幅は広がり、結果として位相分布 $\phi(\lambda)$ の波長域も広がることにより大きくなる。そして、ウエスト部分通過後は、伝搬とともに常に積算されるため増加を続ける。また、遷移部分の伝搬距離160 mmあたりからは、分散値が正常分散値になるため、増加率が大きくなる。この影響を避けるには通常ファイバー部分は短いほうが望ましい。なお、伝搬距離 z が160 mm~170 mmの $\Delta\lambda$ や ϕ_{\max} の急激な変化は、 z の変化とともに分散値が大きく変化し、スペクトル分布の形状が長短両波長側で大きく変動する状況から生じたものである。このことから、テーパファイバー出射後のSC光の位相制御を目的とした場合、単に広いSCスペクトルを得るためだけでなく、スペクトル間の最大位相差 ϕ_{\max} を最小

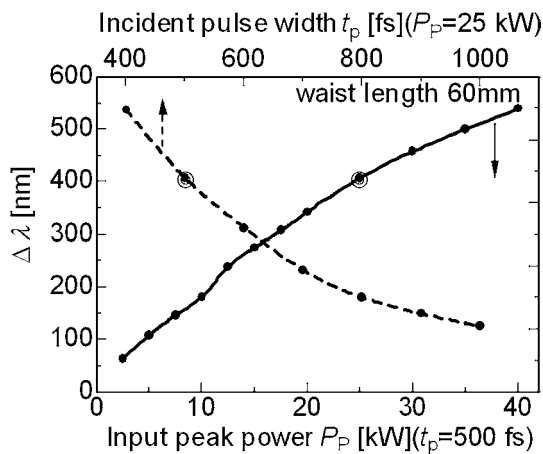


Fig. 5 SC spectral width $\Delta\lambda$ as a function of incident peak power P_p and pulse width t_p .

限に抑えることも考慮しなければならない。そのためには、テーパファイバーは遷移部分や通常ファイバー部分を極力短くし、また、ウエスト部分の長さに応じた適当な入射パルスパラメーターに調整する必要がある。

4.3 入射パルスパラメーター特性

Fig. 5の実線は、入射パルス幅を500 fsに固定してピークパワーを2.5 kW~40 kWの範囲で変えた場合のテーパファイバー射出時の-20 dBでのSCスペクトル幅 $\Delta\lambda$ の変化、破線は、ピークパワーを25 kWに固定してパルス幅を400 fs~1 psと変えた場合のSCスペクトル幅 $\Delta\lambda$ の変化を示す。また、図中の◎印は、Fig. 3およびFig. 4の結果を得た際のパルスパラメーターに相当する。

この結果から、より高パワーのパルスや、より狭いパルスを入射すると、今回用いたパラメーターの範囲では射出スペクトル幅がほぼ単調に増加する傾向にあることがわかる。これは、ファイバー中の自己位相変調効果により、非線形効果が大きくなることが原因と考えられる。

5. テーパーウエスト長の影響

ここでは、テーパファイバーのウエスト部分の長さをいろいろと変えた場合について特性解析した。ウエスト長は、前章で考察した60 mmのほかに、文献20~22で使用された90 mmと長い場合に加えて、容易に製作可能な10 mm, 30 mmと短い場合についても調べた。

5.1 特定の入射パルスの場合

出力光のスペクトル強度分布と位相分布のウエスト長に対する変化をFig. 6に示す。パルスパラメーターは前章までと同じ中心波長1064 nm、パルス幅500 fs、ピークパワー25 kWを用いた。

Fig. 6のスペクトル強度分布 $I(\lambda)$ の結果から、ウエスト

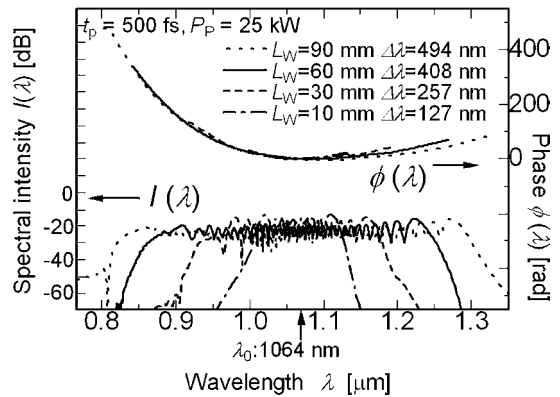


Fig. 6 Pulse spectrum $I(\lambda)$ and phase $\phi(\lambda)$ as a function of wavelength for waist length $L_w = 90$ mm, 60 mm, 30 mm and 10 mm.

長を長くすると、出力光のスペクトル強度分布の帯域が広がることがわかる。これは、テーパウエストが長くなるほど、非線形効果の作用長が長くなるためと考えられる。このことから、テーパファイバーにおいて発生SC光のスペクトル幅に大きく寄与する部分は、ウエスト部分であることが再確認された。

また、Fig. 6の位相分布 $\phi(\lambda)$ に着目すると、各ウエスト長の結果は、重複している波長域ではほぼ重なっている。これらのことから、テーパウエストが長くなるとスペクトル強度分布 $I(\lambda)$ が広がり、結果として位相分布 $\phi(\lambda)$ の波長域も広がり、最大位相差 ϕ_{\max} が大きくなる。このため、ウエストが長くなればスペクトル強度分布 $I(\lambda)$ の広帯域化に有効である反面、最大位相差 ϕ_{\max} が大きくなるという特徴がある。また、最大値から-20 dBのSC幅 $\Delta\lambda$ が400 nm以上のものを得るためには、この入射パルスパラメーターではウエスト長が60 mm程度以上必要であることがわかった。これらのSCスペクトルは入射波長を中心としてほぼ対称的に広がるため、400 nmの帯域幅をもつSC光は1 μm とO-band (Original-band: 1260 nm~1360 nm)との間を埋め、最近話題にされている新しい光通信波長帯(1- μm band)³⁰⁾をカバーできる。さらに、400 nmのSC幅のフーリエ変換限界パルスが得られた場合、数値解析によると、8.6 fs (2.5 cycle)もの超短パルスに相当する。以後、本論文では、最大値から-20 dBでのスペクトル幅が約400 nmまでのSC光について議論する。

5.2 入射パルスパラメーターを変えた場合

次に、テーパファイバーのウエスト長の影響を詳細に調べる。そのため、入射パルス幅や入射ピークパワーのパルスパラメーターを変えた場合のSCスペクトル幅 $\Delta\lambda$ と、スペクトル間の最大位相差 ϕ_{\max} への影響をまとめて、

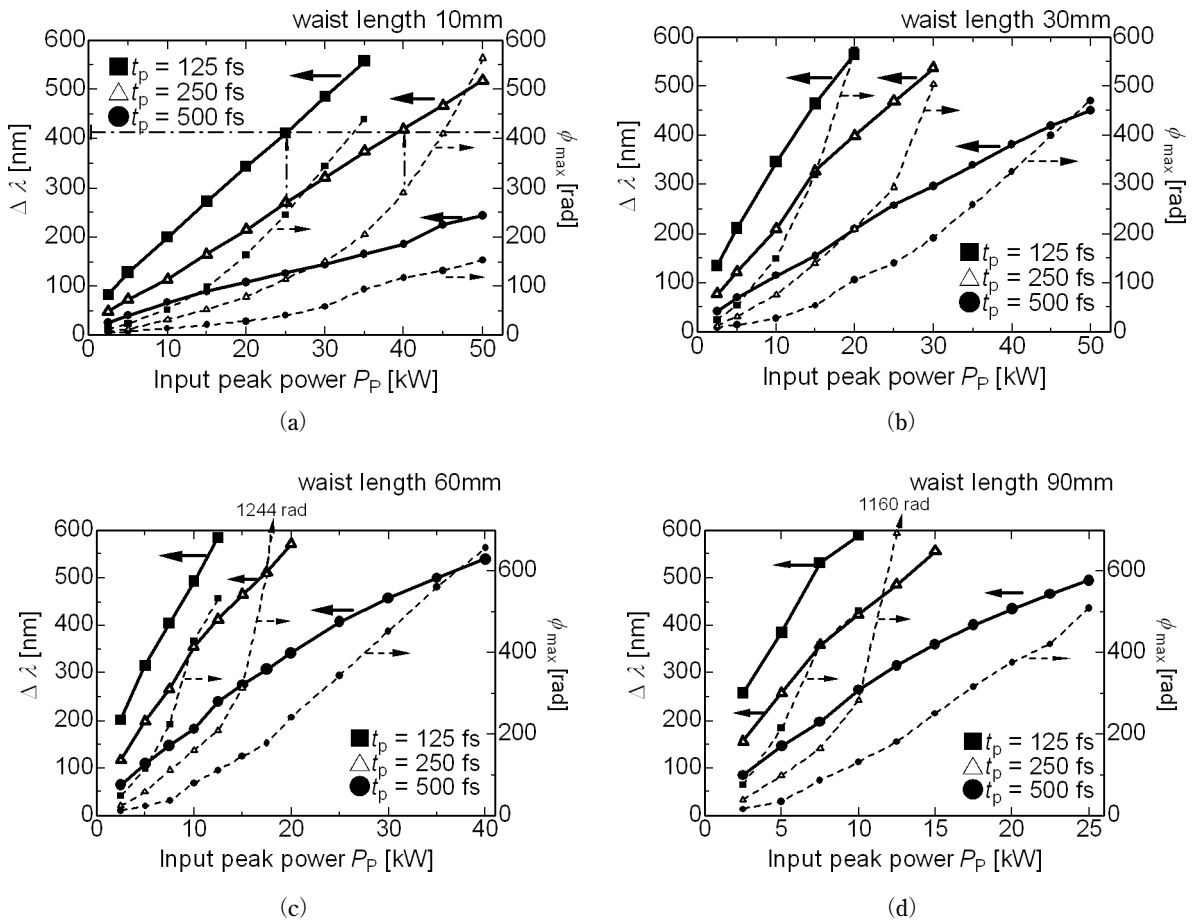


Fig. 7 SC spectral width $\Delta\lambda$ and maximum phase value ϕ_{\max} as a function of input peak power P_p .

Fig. 7(a)~(d) にそれぞれ示す。テーパファイバー出射時のスペクトル強度が最大値の -20 dBとなる点で測ったSCスペクトル幅 $\Delta\lambda$ を実線左軸に、最大位相差 ϕ_{\max} の特性を破線右軸に示す。図中の■印は125 fs、△印は250 fs、●印は500 fsの入射パルス幅の特性である。入射ピークパワーの上限は高光強度による損傷を考慮して50 kWまでとし、今回検討する結果は、 $\Delta\lambda$ の上限が600 nmまで、あるいは ϕ_{\max} の上限を500 radの範囲内で結果を整理した。

これらの結果から、4章3節で述べたように、高パワー入射や短パルス入射において、より広いスペクトル幅 $\Delta\lambda$ が得られる傾向にある。ウエスト長が短くても、高パワー入射や短パルス入射を用いることで、より広いスペクトル幅 $\Delta\lambda$ を得ることができる。すべてのウエスト長においていえることは、高パワー入射や短パルス入射の場合、スペクトル幅 $\Delta\lambda$ と ϕ_{\max} はピークパワーの増加に伴って増加するが、高パワー入射時には ϕ_{\max} が急激に増大することである。この傾向は、入射パルスのパルス幅が短いほど顕著になる。これは、波長分散特性が、ウエスト部分と遷移部分や通常ファイバー部分で大きく異なるためである。つま

り、ウエスト部分の波長分散特性が、Fig. 1の太実線にみられるように、入射波長を中心に短波長側と長波長側でほぼ対称的に同程度の分散量になっている。しかし、遷移部分や通常のファイバー部分では、短波長側と長波長側で分散量が異なるために、非線形効果の影響が短波長側と長波長側では異なる。特に通常のファイバーの部分では、短波長ほど分散量が大きい(Fig. 1の一点鎖線参照)。そのため、短波長側では ϕ_{\max} の増大が顕著になる。この傾向は、ピークパワーが大きいほど、またパルス幅が短いほど非線形効果が大きくなるため、その影響は大きくなる。特にウエスト長が10 mmの場合(Fig. 7(a))、入射パルス幅が250 fsのときパワーが40 kW以上となると、その傾向が顕著に現れる。一方、ウエスト長30 mmの場合(Fig. 7(b))には、入射パルス幅が125 fsでパワーが10 kW、250 fsでパワーが25 kW以上になると、 ϕ_{\max} は急激に増大する。また、ウエスト長60 mmの場合(Fig. 7(c))、入射パルス幅が250 fs、パワーが15 kW以上で ϕ_{\max} は急激に増大する。さらに、ウエスト長90 mmの場合(Fig. 7(d))には、入射パルス幅が250 fsでパワーが10 kW以上のとき ϕ_{\max} は急

激に増大する。ただし、ウエスト長 90 mm (Fig. 7 (d)) の入射パルス幅が 125 fs でパワーが 10 kW 以上の場合、 ϕ_{\max} が急激に増大しないのは、広がったスペクトルの強度分布の平坦性が悪くなるためと考えられる。

5.3 入射条件による最大位相差の比較

さらに、400 nm 程度の SC 幅が得られる場合について、スペクトル間の最大位相差 ϕ_{\max} の比較を行った。その結果、短いパルスを使用した場合、 ϕ_{\max} が小さくなることがわかった。ウエスト長が 10 mm の場合 (Fig. 7 (a) 内の補助線 (一点鎖線) 上の入射条件) には、パルス幅が 125 fs のときのパワーが 25 kW の場合とパルス幅が 250 fs のときのパワーが 40 kW の場合を比較すると、そのことが明らかになる。また、ウエスト長が 30 mm の場合 (Fig. 7 (b))、パルス幅が 250 fs でパワーが 20 kW の場合とパルス幅が 500 fs でパワーが 40 kW の場合とを比較すると、ウエスト長が 10 mm の場合よりも顕著に ϕ_{\max} が小さくなる傾向が現れている。さらに、ウエスト長が 90 mm の場合 (Fig. 7 (d)) においても、パルス幅 125 fs でパワーが 5 kW の場合とパルス幅が 500 fs でパワーが 17.5 kW の場合についても、そのことが顕著になっている。このことから、SC 幅 $\Delta\lambda$ を広げるためには、非線形効果を増すために高パワーや幅の狭いパルスを使用することが必要であるが、 ϕ_{\max} の増大を防ぐという点では、より幅の狭いパルスを入射することが有効である。ただし、ウエスト長が 60 mm の場合 (Fig. 7 (c))、パルス幅が 125 fs でパワーが 7.5 kW の場合とパルス幅が 250 fs でパワーが 12.5 kW の場合を比較したとき、必ずしも、短いパルス使用が ϕ_{\max} を小さく抑えられる傾向にはない。この例外的な場合について詳細に調べるために、Fig. 8 にそれらの伝搬距離 z におけるスペクトル幅 $\Delta\lambda$ と最大位相差 ϕ_{\max} の変化を示す。この図の ϕ_{\max} に関して、伝搬距離 z が 100 mm ~ 175 mm までに着目すると、入射パルス幅が広い場合、400 nm 程度の SC 幅を得るためには、より大きいパワーが必要になる。そして、このことが位相に大きく影響しているため、パワーが大きいほど ϕ_{\max} が大きくなる関係が成立している。しかし、伝搬距離 z が通常ファイバー部分に入った 180 mm を過ぎたあたりからは、125 fs と 250 fs の関係が逆転している。これは、5 章 2 節でも述べたように、遷移部分や通常ファイバー部分において波長分散特性が大きく変化し、入射波長を中心として短波長側と長波長側での分散量が大きく異なる非対称な分布になるためである。そのため、パワーが大きいことによる ϕ_{\max} を大きくさせる効果よりも、パルス幅が狭いことによる ϕ_{\max} を大きくさせる効果が強くなったと考えられる。これらの悪影響を避けるためには、遷移部分や通常

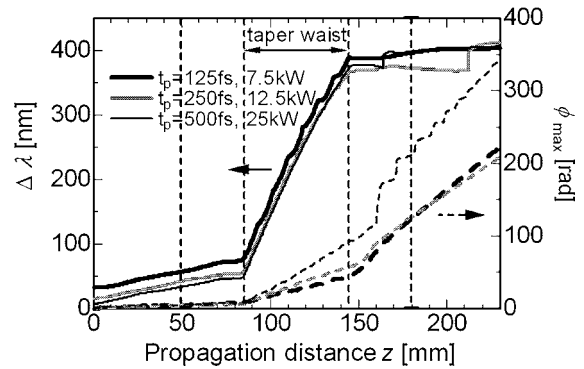


Fig. 8 Evolution of the spectral width $\Delta\lambda$ and maximum phase value ϕ_{\max} as a function of the propagation distance z for $t_p=125$ fs, $P_p=7.5$ kW and $t_p=250$ fs, $P_p=12.5$ kW and $t_p=500$ fs, $P_p=25$ kW with waist length $L_w=60$ mm.

ファイバー部分ではできる限り短くしなければならない。このことから、 ϕ_{\max} の増大を抑えるには、ウエスト部分の効果のみを考えた場合には入射パルス幅を狭くすればよいが、高パワー入射時には遷移部分と通常ファイバー部分の効果による影響も考慮しなければならないことがわかる。

以上のことから、テーパファイバー作製における容易性、 ϕ_{\max} 抑制の観点から、短いウエスト長のテーパファイバーを使用し、テーパ形状とパワーに合った適度な短いパルス幅を入射することが有効であると考えられる。ウエスト長が短い場合は、非線形効果が生じる領域が短いため、スペクトル幅の広い SC 光は発生しづらい。しかし、高パワーを入射するか、短パルスを入射することにより十分可能である。例えば、ウエスト長が 10 mm の場合 (Fig. 7 (a))、パルス幅が 125 fs で 25 kW の高パワーを用いることで、245 rad の比較的小さい ϕ_{\max} を伴った 412 nm の SC スペクトルが得られている。

5.4 ウエスト長依存特性

次に、ウエスト長 L_w の依存性を詳しく調べるため、5 章 2 節で示した Fig. 7 (a) ~ (d) から代表的なパラメーターを選択した。パルス幅は 125 fs と 500 fs に限定し、各曲線のパワーの選定はウエスト長 90 mm の場合において、各パルス幅での SC スペクトル幅がほぼ同程度得られているものにした。SC スペクトル幅 $\Delta\lambda$ について Fig. 9 (a) に、スペクトル間の最大位相差 ϕ_{\max} について Fig. 9 (b) に示す。

まず、Fig. 9 (a) から、ウエスト長が長くなれば、より広い SC スペクトル幅が得られることが各パルス幅に共通して再確認された。また、スペクトル幅の増加率も、パワーが大きいほど、より広がる傾向にあることがわかった。これらは、非線形作用長が長くなるためであると考えられる。また、広いパルス幅 500 fs で高パワー 25 kW のと

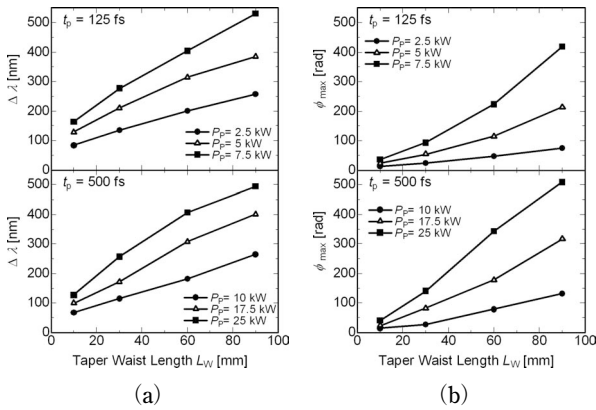


Fig. 9 (a) SC spectral width $\Delta\lambda$ and (b) maximum phase value ϕ_{\max} as a function of waist length L_W of different peak powers P_P for pulse widths of 125 fs and 500 fs.

きには、ウエスト長を長くした場合、SC スペクトル幅の広がりの増加率が低下する傾向がある。これは、パワーを大きくすると非線形効果が強くなり、広がったスペクトルの強度分布の平坦性に問題が生じてしまうことが原因であると考えられる。

次に、Fig. 9 (b) から、ウエスト長が長くなれば ϕ_{\max} が増大してしまうことが、各入射パルス幅に同じようにみられた。また、ウエスト長を長くした場合の ϕ_{\max} の増加率は、パワーが大きいほど、さらに大きくなっていく傾向にある。特に、125 fs の短パルス幅で 7.5 kW の高パワー入射時の場合に顕著に現れている。しかし、 ϕ_{\max} の値そのものは、500 fs の広いパルス幅の場合よりも、125 fs の短パルス幅の場合のほうが小さく抑えられている。

このことから、 ϕ_{\max} を抑制するという観点からは、ウエスト長はそれほど長い必要はなく、それに適したパルスパラメーターを選ばなければならない。また、パワー効率の観点からも、適度な短いパルス幅を選択し、入射するのが有効であると考えられる。ウエスト部分前でのパルス幅の広がりを抑える対策としては、Fig. 2 の最初の通常ファイバー部分や遷移部分の長さを極力抑えたり、ファイバーで生じる分散効果を相殺させるチャープを入射パルスにあらかじめ導入する等の工夫が必要である。さらに、前章までの結果から、ウエスト部分通過後の遷移部分や通常ファイバー部分では ϕ_{\max} が大きくなっていくため、この部分の長さも極力抑えなければならないことも付け加えておく。

6. まとめ

フェムト秒の超短パルス光を重水中に設置したテーパファイバーに入射した場合に発生した SC 光のスペクトル強度と位相の特性を、テーパファイバーのクラッド径が

伝搬方向に変化し、波長分散特性が変化する非線形シュレーディンガー方程式を用いて、厳密な数値解析を行った。その結果、SC 発生はおもにウエスト部分で起こり、そのウエスト長が SC スペクトル幅に大きく寄与していることがわかった。また、パルス幅、ピークパワーの入射パルスパラメーターやテーパファイバーのウエスト長の依存性について調べた。高パワー、狭いパルス幅を入射パルスとして使い、かつ長いウエスト長のテーパファイバーを使用すると、得られる発生 SC 光のスペクトル幅は増加する傾向にあることがわかった。しかし、ファイバー内で積算される非線形効果のため、最大位相差 ϕ_{\max} の増大も避けられない。このことより、テーパファイバー作製における容易性や最大位相差 ϕ_{\max} の抑制の観点から、短ウエスト長で SC スペクトル波形に影響が出ない程度の短パルス・高パワーを使用するのが有効であると考えられる。その結果、中心波長が 1064 nm、パルス幅が 125 fs、ピークパワーが 25 kW の光パルスを入射したとき、ウエスト長が 10 mm と短いテーパファイバーでも、 ϕ_{\max} の増加を抑えた 412 nm の広帯域 SC スペクトルが得られることがわかった。本論文の結果は、広帯域の波長領域で位相制御を目的としたデバイスの設計に役立つことが期待される。

本研究を行うにあたり、プログラム作成でご協力いただいた室蘭工業大学大学院博士後期課程（現（株）フジクラ光電子技術研究所光ファイバ技術研究部）の王朝陽氏に感謝いたします。また、本研究の数値計算はおもに北見工業大学情報処理センターの高速演算サーバーを用いて行った。なお、本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（C）No. 21560038 の助成を受けたものである。

文 献

- 1) R. R. Alfano: *The Supercontinuum Laser Source* (Springer Verlag, New York, 1989).
- 2) 猿渡正俊：“テラビット光通信と光パルス”，*光学*, **32** (2003) 588–596.
- 3) K. Mori, H. Takara, S. Kawanishi, M. Saruwatari and T. Morioka: “Flatly broadened supercontinuum spectrum generation in a dispersion decreasing fibre with convex dispersion profile,” *Electron. Lett.*, **33** (1997) 1806–1807.
- 4) T. Okuno, M. Onishi and M. Nishimura: “Generation of ultra-broad-band supercontinuum by dispersion-flattened and decreasing fiber,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **10** (1998) 72–74.
- 5) F. Futami, Y. Takushima and K. Kikuchi: “Generation of wide-band and flat supercontinuum over a 280-nm spectral range from a dispersion-flattened optical fiber with normal group-velocity dispersion,” *IEICE Trans. Electron.*, **E82-C** (1999) 1531–1538.
- 6) 曾根宏靖, 荒井 将, 河野健司, 今井正明, 今井 洋: “分散フラット/減少ファイバーを用いた広帯域スーパーコンティ

- ニウムスペクトルの発生条件”, 光学, **30** (2001) 522–527.
- 7) H. Sone, T. Arai, M. Imai and Y. Imai: “Modal birefringence dependent supercontinuum due to cross-phase modulation in a dispersion-flattened/decreasing fiber,” *Opt. Rev.*, **9** (2002) 89–93.
 - 8) H. Sone, M. Imai, Y. Imai and Y. Harada: “The effect of input azimuth of cross-phase-modulated soliton pulses on supercontinuum generation in a dispersion-flattened/decreasing fiber with low birefringence,” *IEICE Trans. Electron.*, **E86-C** (2003) 714–718.
 - 9) J. K. Ranka, R. S. Windeler and A. J. Stentz: “Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm,” *Opt. Lett.*, **25** (2000) 25–27.
 - 10) S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt, J. D. Harvey, J. C. Knight, W. J. Wadsworth and P. St. J. Russell: “White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber,” *Opt. Lett.*, **26** (2001) 1356–1358.
 - 11) T. A. Birks, W. J. Wadsworth and P. St. J. Russell: “Supercontinuum generation in tapered fibers,” *Opt. Lett.*, **25** (2000) 1415–1417.
 - 12) S. M. Kobtsev, S. V. Kukarin and N. V. Fateev: “Controlling the width of a femtosecond continuum generated in a small-diameter fiber,” *Quantum Electron.*, **32** (2002) 11–13.
 - 13) J. M. Harbold, F. O. Ilday, F. W. Wise, T. A. Birks, W. J. Wadsworth and Z. Chen: “Long-wavelength continuum generation about the second dispersion zero of a tapered fiber,” *Opt. Lett.*, **27** (2002) 1558–1560.
 - 14) J. M. Dudley and S. Coen: “Numerical simulations and coherence properties of supercontinuum generation in photonic crystal and tapered optical fibers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **8** (2002) 651–657.
 - 15) J. Teipel, K. Franke, D. Törke, F. Warken, D. Meiser, M. Leuschner and H. Giessen: “Characteristics of supercontinuum generation in tapered fibers using femtosecond laser pulses,” *Appl. Phys. B*, **77** (2003) 245–251.
 - 16) M. Kolesik, E. M. Wright and J. V. Moloney: “Simulation of femtosecond pulse propagation in sub-micron diameter tapered fibers,” *Appl. Phys. B*, **79** (2004) 293–300.
 - 17) P. Bejot, B. E. Schmidt, J. Kasparian, J.-P. Wolf and F. Legare: “Mechanism of hollow-core-fiber infrared-supercontinuum compression with bulk material,” *Phys. Rev. A*, **81** (2010) 063828.
 - 18) L. Xu, N. Nakagawa, R. Morita, H. Shigekawa and M. Yamashita: “Programmable chirp compensation for 6-fs pulse generation with a prism-pair-formed pulse shaper,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **36** (2000) 893–899.
 - 19) N. Karasawa, L. Li, A. Suguro, H. Shigekawa, R. Morita and M. Yamashita: “Optical pulse compression to 5.0 fs by use of only a spatial light modulator for phase compensation,” *J. Opt. Soc. Am. B*, **18** (2001) 1742–1746.
 - 20) R. Zhang, J. Teipel, X. Zhang, D. Nau and H. Giessen: “Group velocity dispersion of tapered fibers immersed in different liquids,” *Opt. Express*, **12** (2004) 1700–1707. (<http://www.opticsexpress.org>)
 - 21) C. M. B. Cordeiro, W. J. Wadsworth, T. A. Birks and P. St. J. Russell: “Octave supercontinuum generated in tapered conventional fibres by a nanosecond 1064 nm laser,” *Technical Digest of CLEO/IQEC 2004*, CThC2 (2004).
 - 22) C. M. B. Cordeiro, W. J. Wadsworth, T. A. Birks and P. St. J. Russell: “Engineering the dispersion of tapered fibers for supercontinuum generation with a 1064 nm pump laser,” *Opt. Lett.*, **30** (2005) 1980–1982.
 - 23) 曾根宏靖, 王 朝陽, 辻 寧英, 中村真毅, 原田康浩, 今井正明: “1064 nm パルス光による重水中分散制御テーパファイバの高効率スーパーコンティニウム発生”, 電子情報通信学会技術研究報告, **108** (2009) 145–150.
 - 24) 王 朝陽, 辻 寧英, 曾根宏靖, 今井正明, 佐藤信也: “テーパファイバの有効コア断面積および群速度分散特性”, 電子情報通信学会論文誌 (C), **J90-C** (2007) 392–393.
 - 25) L. B. Jeunhomme: *Single-Mode Fiber Optics* (Marcel Dekker, New York, 1983) pp. 128–141.
 - 26) E. B. Treacy: “Optical pulse compression with diffraction gratings,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-5** (1969) 454–458.
 - 27) Z. Wang, H. Sone, Y. Tsuji and M. Imai: “Spectral phase and intensity evolutions of supercontinuum generation in a biconical tapered fiber,” *Opt. Rev.*, **14** (2007) 81–85.
 - 28) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd ed. (Academic Press, New York, 1995) pp. 50–54.
 - 29) M. Shibata, M. Hirasawa, N. Nakagawa, R. Morita, A. Suguro, H. Shigekawa and M. Yamashita: “Experimental demonstration of phase-dispersion compensation for ultra-broadband femtosecond optical pulses generated by induced-phase modulation,” *Appl. Phys. B*, **74** (2002) S291–S294.
 - 30) N. Yamamoto, Y. Omigawa, K. Akahane, T. Kawanishi and H. Sotobayashi: “Simultaneous 3×10 Gbps optical data transmission in 1-μm, C-, and L-wavebands over a single holey fiber using an ultra-broadband photonic transport system,” *Opt. Express*, **18** (2010) 4695–4700. (<http://www.opticsexpress.org>)