

誘起位相変調を用いた 800nm 帯 Super-continuum 光パルスの発生とパルス圧縮 Generation of a Super-continuum around 800 nm by Induced Phase Modulation and Pulse Compression of the Fundamental Light

吉清健太(M1),近藤昇平(M2),大石裕(助教)

K. Yoshikiyo, S. Kondo, and Y. Oishi

Abstract

We demonstrate generation of a super-continuum (SC) pulses by induced phase modulation (IPM) in an Ar-gas-filled hollow core fiber and compression of the pulses. Generation of SC pulses by IPM at relatively low pressures resolves an issue of ionization and achieves broader spectra with better transmission efficiencies. We compress the SC pulses with chirp mirrors.

1. はじめに

非線形効果を用いたフェムト秒パルスレーザの広帯域化は、高次高調波やアト秒パルスの発生の際に用いられる数サイクル光パルスの発生を可能にするため、幅広く研究が行われている[1,2]。フェムト秒パルスレーザの広帯域化を行う方法の一つは1996年にNisoliらが提案した中空ファイバがある[3]この方法は自己位相変調(Self Phase Modulation:SPM)によるsuper-continuum(SC)光パルスの発生だけでなく、ファイバが空間モードフィルタとして機能するためビーム品質の高いパルスが得られるメリットもある。しかし更なる広帯域化を目指す場合、より高強度な光パルスを入射するかファイバに充填しているガスの圧力を高める必要があるが、ファイバの入射端近傍で発生する自己収束とイオン化がファイバのカップリングロスやビーム品質の低下を招いてしまう。この問題を解決する方法としてガス圧勾配中空ファイバ[4]、円偏光入射[5]やイオン化しきい値の高い希ガスに変更する方法[6]が提案されてきた。

一方、新しい解決方法として同じ希ガス充填中空ファイバを用いた誘起位相変調(Induced Phase Modulation:IPM)による広帯域化がある[7]。IPMとは、前述のSPMとは異なり、2つ以上の異なる波長帯域の光パルスの相互作用に基づいて広帯域化される。その効果はそれぞれの光パルスのSPMの効果に加え、強度比や時間遅延を

最適化することにより、異なる波長帯域の間のスペクトル成分を発生させるため非常に広帯域で高強度な光パルスとなる[8]。

IPMの利用では、得られる帯域がおおよそ350 nm-900 nmと非常に広いが、その全帯域を1つの波形整形器で位相補償するには空間光変調器の周波数応答のだけでなく、4f光学系の角度分散素子の観点からも困難である。そこで我々はIPMによる超広帯域パルスの基本波帯域と第2高調波帯域をそれぞれの波形整形器で位相補償することで全帯域位相補償を試みる。

2. Arガス充填中空ファイバによる広帯域パルスの発生

Fig.1に中空ファイバを用いたSPMによる広帯域フェムト秒レーザパルス発生光学系のセットアップを示す。CPAからの光パルスは高強度であるため、少しのアライメントミスによりファイバが焼焦げる可能性があるのでHeNeレーザによるガイド光を設けてアライメントを行った。

イオン化の問題は単にコア径を大きくする必要があり、コア径を大きくしたぶん集光強度が足りなくなるのでファイバの長さを長くする必要がある。よって、圧力を1.0 atmとして以下の式を用いて適切な中空ファイバのコア径と長さを計算した。結果コア径が300umとなり長さは約2.0 mとなった。実際の中空ファイバの仕様はコア径が300 um長さが105 cmの物を使用した。長さが足りない分はガス圧を上げて非線形性を稼ぐ仕様とした。

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P} \quad (1)$$

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}} \quad (3)$$

$$T_0 = \frac{T_{FWHM}}{2\sqrt{\ln 2}} \quad (4)$$

$$L_{opt} = (6 \times L_{NL} \times L_D)^{1/2} \quad (5)$$

L_{NL} :非線形長 L_D :分散長 L_{opt} :最適なファイバ長

T_0 :パルス幅(31 fs) β_2 :2次分散(40 fs²/m) γ :非線形定数

n_2 :非線形感受率(9.8×10^{-24} m²/W · bar)

ω_0 :中心周波数(2.34×10^{15} /s) A_{eff} :有効コア面積

Fig.2とTable.1に入射強度550 μ J/pulseの時のガス圧変化に伴うスペクトルの変化と透過率の測定結果を示す。なお、この時の入射パルスの時間幅は51fs スペクトル幅は25 nm 集光サイズは水平方向が200 μ m、垂直方向200 μ mである。ガス圧の増加に伴いスペクトルの広帯域化が確認され、最終的には600-900nmまで広帯域化された。また、ガス圧が120kPaの時でも透過率は60%を超え、イオン化によるカップリング損失は見られなかった。

続いてFig.3に中空ファイバを用いたIPMによる広帯域フemtosecond レーザパルス発生の光学系のセットアップを示す。厚さ1mmのBBO結晶から同軸で射出した基本波と2倍波の光パルスは直後のダイクロックミラーによって分割され、基本波の光路に時間遅延を設けることにより時空間のオーバーラップを実現した。

ガス圧が150 kPaの時のSPMとIPMの基本波スペクトルの変化をFig.4に示す。この時、2倍波は230 μ J 時間幅は51 fs 集光サイズは水平方向が130 μ m、垂直方向175 μ mであり、基本波と2倍波は偏光方向が直行した状態であった。この結果よりIPMがSPM以上の広帯域化を促し、さらに透過率も69%(490 μ J \rightarrow 340 μ J)と高い率を維持していることから、IPMにより広帯域で高強度な光パルスが発生されたことが分かる。

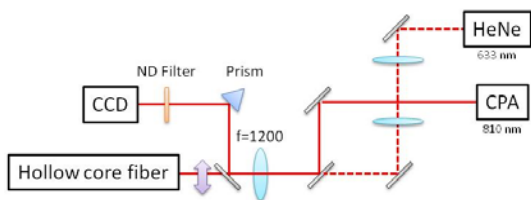


Fig.1 Setup of spectrum broadening experiment using an Ar-gas-filled hollow core fiber.

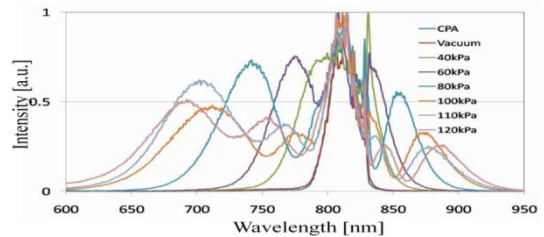


Fig.2 The result of SC spectra of the fundamental light at various Ar gas pressures.

Table.1 The efficiency of transmission of fundamental light in the HCF.

	input power [μ J]	output power [μ J]	efficiency [%]
vacuum	550	351	63.8
40kPa	550	342	62.2
60kPa	550	354	64.4
80kPa	550	363	66.0
100kPa	550	351	63.8
110kPa	550	359	65.3
120kPa	550	333	60.5

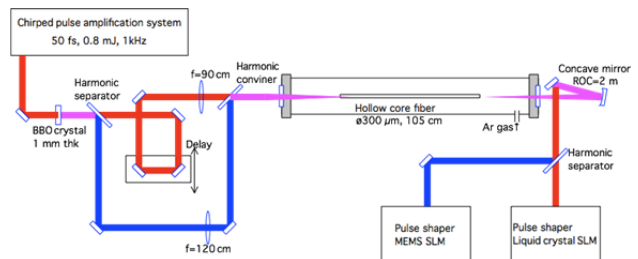


Fig.3 Schematic for IPM experiment.

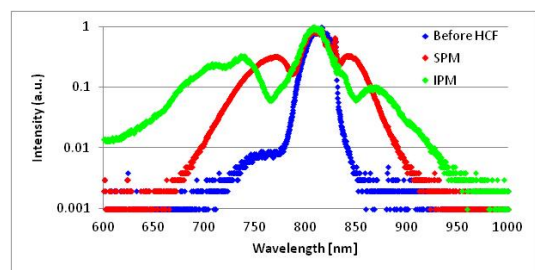


Fig.4 Spectra of the fundamental light with and without 400-nm pulse IPM.

3. チャープミラーによる広帯域パルスのパルス圧縮

アルゴンガス充填中空ファイバによって発生させたSC光パルスチャープミラーでパルス圧縮を行った。実験セットアップは、中空ファイバ直後にダイクロックミラーを配置し再度、基本波と2倍波の帯域で分割した。分割された基本波はチャープミラー(シグマ光機社製: -65 fs²/Ref)を9回反射した後にSPIDERによって測定した。まず中空ファ

イバ入射光パルスのスペクトル強度・位相と時間波形を Fig.5に示す。Fig.5よりスペクトル幅は25 nm 時間幅は59 fs でありCPAのコンプレッサーによりFTLパルスとなっていることが分かる。Fig.6にガス圧が17,120 k Paの状態におけるSPMのみによるSC光パルスの圧縮前後のスペクトル強度・位相と時間波形を示す。各ガス圧での時間幅は 17 kPaの時の圧縮前では49 fs、圧縮後では39 fs、120 kPaの時の圧縮前では69 fs、圧縮後では32 fs、であった。また、120 kPaの時の時間位相もほぼフラットなので、チャープミラーにより2次分散補償が出来たと言える。

最後にガス圧が150 k Paの状態におけるSPMとIPMによるSC光パルスの圧縮前のスペクトル強度・位相と時間波形をFig.7に示す。SPMとIPMのスペクトル位相を比較すると両者に大きな差はないことが分かる。

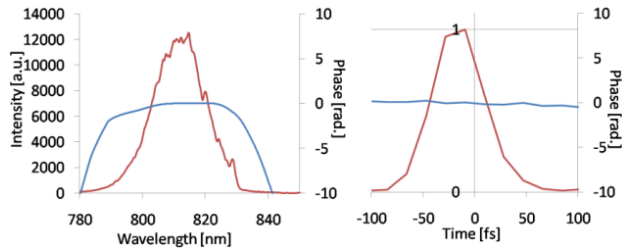


Fig.5 Spectrum intensity and phase of the CPA pulse launched to the HCF.

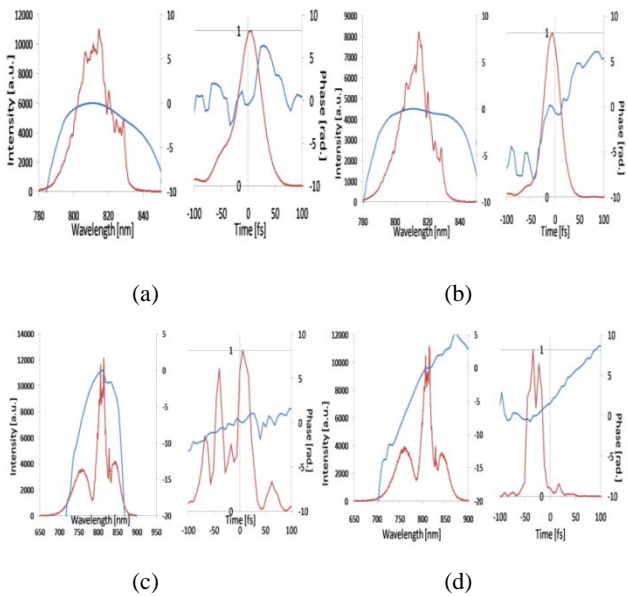


Fig.6 Spectra and timehistories before and after the chirped mirror compressor at various gas pressures : (a) before chirped mirrors at 17 kPa; (b) after chirped mirrors at 17 kPa; (c)

before chirped mirrors at 120 kPa ; and (d) after Chirped mirrors at 120 kPa.

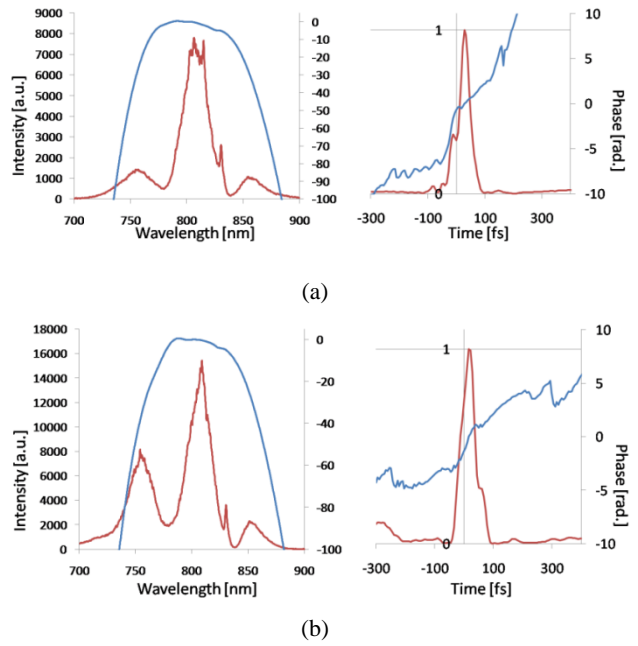


Fig.7 Spectra and timehistories of SC pulses before compression: (a) SPM only; and (b) with IPM of 400 nm pulse.

4. Super-continuum光パルス波形整形

Fig.8にIPMを用いたSuper-continuum光パルスの基本波帯域用波形整形器の実験セットアップを示す。この波形整形器の詳細は他のレポートで述べるが、特徴としては高効率を実現するためにプリズム(E-FDS1)による角度分散を用い、色収差を軽減するために凹面鏡によるコリメートを行った。この波形整形器により650-900 nmの波長帯域の光パルスが整形可能となる。

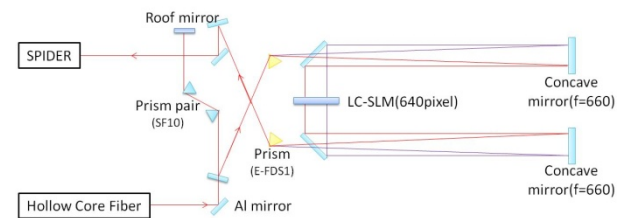


Fig.8 Schematic for a broadband pulse shaper for 800 nm SC pulses.

5. まとめ

本研究では誘起位相変調を用いたSC光パルスの発生とパルス圧縮を行った。IPMによるSC光パルスの発生は、ガス圧の上昇に伴う中空ファイバのイオン化の問題を解決するだけでなく、SPMと比べ、広い波長帯域が得られる上に透過率も良い結果となった。また、ガス圧が17,120 k Paの状態におけるSPMによるSC光パルスの圧縮をチャープミラーで実現し、SPIDERで計測した。

今後は、チャープミラーだけでは補償しきれない高次の分散も補償するため、SC光パルスの波形整形を試みる。また、同時にIPMによるSC光パルスの圧縮を試みる。

References

- [1] T. Sekiawa et al, Nature **432**,605(2004)
- [2] M. Dantus et al, Chem. Rev., **104**, 1813(2004)
- [3] M.Niosoli et al, Opt. Lett., **22**, 522, (1997)
- [4] A.Suda et al, Appl.Phys.Lett **86**, 111116(2005)
- [5] X.Chen et al. Opt.Lett **34**, 1588(2009)
- [6] J.Chen et al. Opt.Lett **33**, 2992(2008)
- [7] E. Matsubara et al.:J. Opt. Soc. Am. B, **24**, 985 (2007)
- [8] Fang Shaobo et al IEEE Photon. Techno. Lett.,**23**,688(2011)