

中空ファイバによる白色光発生と圧縮パルスの計測

Compression of White Continuum Pulse Generated in an Ar Gas-Filled Hollow Fiber.

吉清健太(B4), 近藤昇平(M1), 大石裕

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

Abstract

White light continuum pulses are generated in an Ar gas-filled hollow fiber and compressed by chirped mirrors. The laser pulses are measured by SPIDER. When the femtosecond laser pulses generated from a multi-pass amplifier enter the hollow fiber, the shorter wavelength region is broadened but the longer wavelength side is not broadened presumably due to photo-ionization plasma.

1. はじめに

フェムト秒パルスレーザーは超高速性、広帯域性、高強度などCWレーザーにはない特性を持っているためその応用は多岐にわたるものである[1,2]。中でもフェムト秒レーザーを用いることで光と物質の相互作用を観察し化学反応等の制御をする研究が広く行われているが、より広帯域なスペクトル成分をカバーすることで、制御性の向上が期待できる。また、高い光電場下では、トンネル電離などの非線形光学も誘起でき、低光電場では不可能な制御性を利用することも出来る。通常、このようなパルス得る技術として中空ファイバを用いた広帯域化とパルス圧縮がある[3]。

一方、超短パルスレーザーの時間域におけるパルスの測定はフェムト秒という超高速性ゆえに、直接的には困難であり、通常は非線形光学結晶を用いた間接的な測定を行うのが一般的であり、中でもFROG (Frequency-Resolved Optical Gating)[4] と SPIDER(Spectral Phase Interferometry for Direct Electrical-field Reconstruction)[5]は広く使われている。我々もこれまで、FROGの一種で光カー効果による偏光ゲートを利用したPG-FROG (Polarization-Gate FROG)[6]によるパルス測定を行ってきた。しかし、この方法は、非線形結晶における位相整合帯域の制限を受けるので、白色光パルス計測には適さない。よって我々は広帯域化されたパルスの測定も出来るよう SPIDER を構築し、チャープミラーおよび

LC-SLM(Liquid Crystal Spatial Light Modulator)波形整形器を用いた分散補償によって中空ファイバで広帯域化された白色光パルスのパルス圧縮を検証した。

2. SPIDERを用いたパルス波形計測

Fig.1にSPIDERのセットアップを示す。被測定パルスははじめ、石英板により①透過光②石英板表面の反射光③石英板裏面の反射光の3つのパルスに分ける。①の透過光はその後ガラス(SF10)の分散素子を通過するため2次分散(22411 fs^2)を与えられ線形チャープパルスとなる。一方、②と③のパルスは遅延時間 $\tau=499.5 \text{ fs}$ のダブルパルスとなる。チャープパルスとダブルパルスはミラーの距離を調節することで非線形結晶であるBBO結晶から和周波を発生するが、ダブルパルス②と③の遅延時間差 τ によって発生する和周波の周波数はシフトする。この2つの和周波を分光器で測定するとスペクトルは周波数干渉を起こす。干渉のフリッジ解析からスペクトル位相を求め、フーリエ変換によって被測定パルスの電界波形ができる。

Fig.2はSPIDERを評価するため、CPAからのパルスをSPIDERとPG-FROGの両方で測定した結果である。なお、(c)(d)はLC-SLMで3次分散(TOD: Third Order Dispersion)を与えFTL(Fourier Transform Limit)パルスにした時のスペクトルである。まず(a)(b)を比較した場合、両者ともスペクトル位相がフラットでないことがわかる。一方、(c)(d)ではLC-SLMによる分散補償を行ったため、両者ともスペクトル位相がフラットであるのが確認できる。このことから、パルス幅30 fs秒のパルスに対しては、FROGとSPIDERの両者の測定結果が一致していることを確認できた。

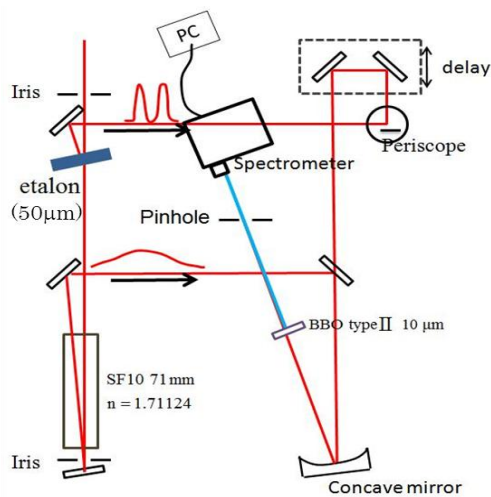


Fig.1 Experimental setup of SPIDER

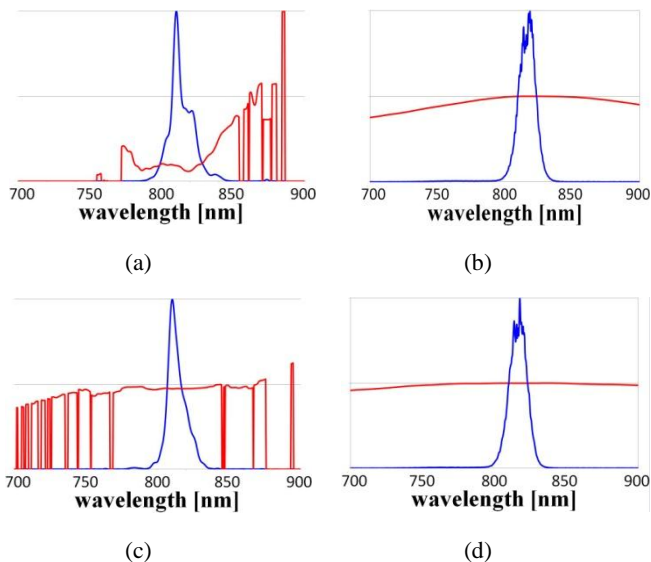


Fig.2 Experimental results of pulse compression measured by FROG and SPIDER (a)FROG TOD:0 ps⁻³ (b)SPIDER TOD: 0 ps⁻³ (c)FROG TOD: 3 × 10⁻⁴ ps⁻³ (d)SPIDER TOD: 3 × 10⁻⁴ ps⁻³

3. 中空ファイバによる白色光発生とパルス圧縮

Fig.3に白色光発生における実験セットアップの概要を記す。モード同期発信器からのパルスは前置型波形整形器のLC-SLMによって任意の分散量を与えられた後、チャープパルス増幅器(Chirped Pulse Amplification)に入射される。

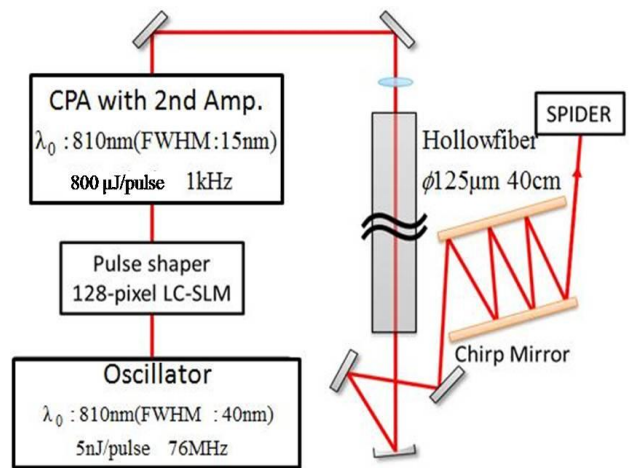


Fig.3 Experimental setup of white light generation.

なお、以前CPA内のパルスストレッチャーにおいて、凹面鏡と凸面鏡の表面が酸化されており、シード強度の低下によりASE成分も無視できなかった。それらを新しく取り替えたためオシレーターからストレッチャーへのスループットは1.3%から9.1%と7倍ほど向上した。さらにCPA内の増幅器では再生増幅器とマルチパス増幅器の2段階の増幅によってCPA出射後の平均エネルギー800 μJ/pulseが得られた[7]。このCPAからの出射パルスにCPA内のコンプレッサーで取り除くことのできない3次分散がある。これはCPA内のコンプレッサーのグレーティングの距離を2次分散が最適になるように調整したためである。この3次分散を取り除くためにLC-SLMで3次分散量(TOD)3.00 × 10⁻⁴ ps⁻³を与えた(Fig.5)。これでCPA後の出射パルスはほぼFTLパルスとなったといえる。しかしその一方で、利得媒質の帯域特性などの原因によりスペクトルの狭帯域化が生じ、帯域幅が発振器の40nm(FWHM)から15nmまで狭まってしまった。このCPAからのパルスを使ってアルゴンガス充填の中空ファイバによってスペクトルの広帯域化を行った。Fig.6にガス圧を変化したときのスペクトル変化を示す。また、Fig.7に昨年度に行ったCPA出射後の平均エネルギー400 μJ/pulseでの同様にガス圧を変化したときのスペクトル変化を示す[8]。

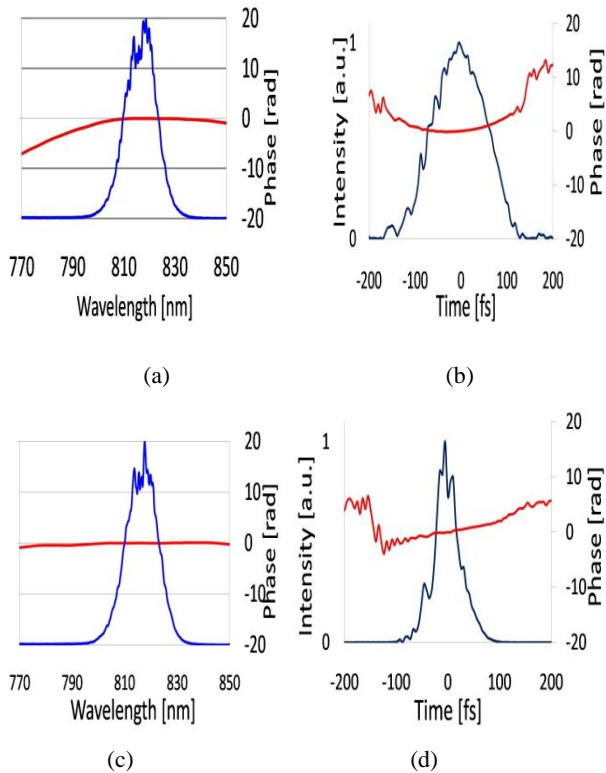


Fig.5 (a) Power spectrum and spectral phase of the output pulses from the CPA system. (b) Reconstructed temporal waveform of (a). (c) Power spectrum and spectral phase of the output pulses from the CPA system after compensating third order dispersion ($3 \times 10^{-4} \text{ ps}^{-3}$) with LC-SLM. (d) Reconstructed temporal waveform of (c).

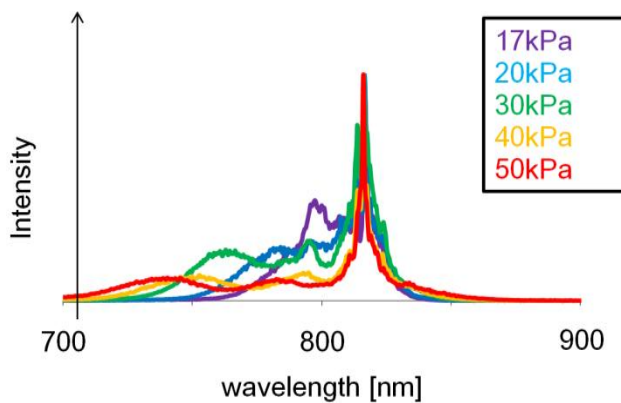


Fig.6 The spectrum by the changing of gas pressure.

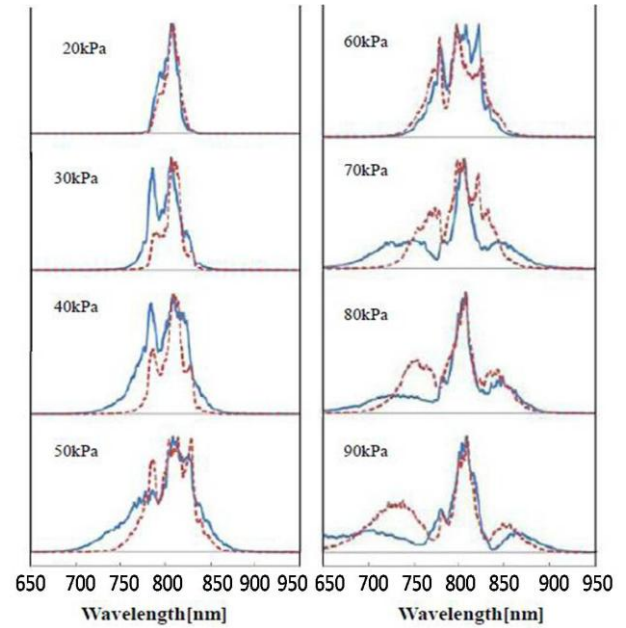


Fig.7 Measurement of spectrum evolution at different gas pressure for linearly polarized (solid line) and circularly polarized (dashed line) beam pulse [8].

Fig.7ではガス圧を90kPaまで上げてても広帯域化がされているが、Fig.6ではいずれのガス圧でも長波長側で広帯域化がされていない。この原因としてファイバ内におけるイオン化が考えられる。このため本実験ではファイバ出射後のビームのプロファイルが最も良い状態であった30kPaで設定し実験を行った。ガス圧を変えた時のビームの透過率をFig.8に示す。Fig.8より30kPaでのビームの透過率は26%であった。

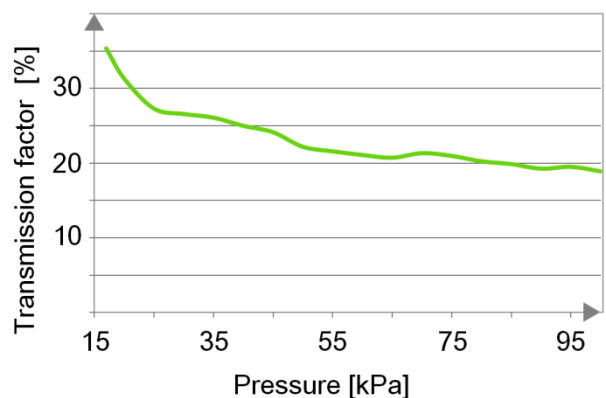


Fig.8 The transmission factor by the changing of gas pressure

中空ファイバでは主に正の2次分散が生じるため、中空

ファイバ後のパルスの分散補償としてチャープミラーを使用した。本実験で使用するチャープミラーは負の二次分散がかかるように設計されており、チャープミラーの反射回数を調節することで大まかな二次分散を取り除くことができる。Fig.9にチャープミラーの反射往復回数の変化によるスペクトル位相の変化を示す。反射往復回数を3~5回でのスペクトルの測定を行った。その結果、反射往復回数が5回の際にスペクトル位相がフラットとなり、二次分散量がゼロになっていることが分かる。

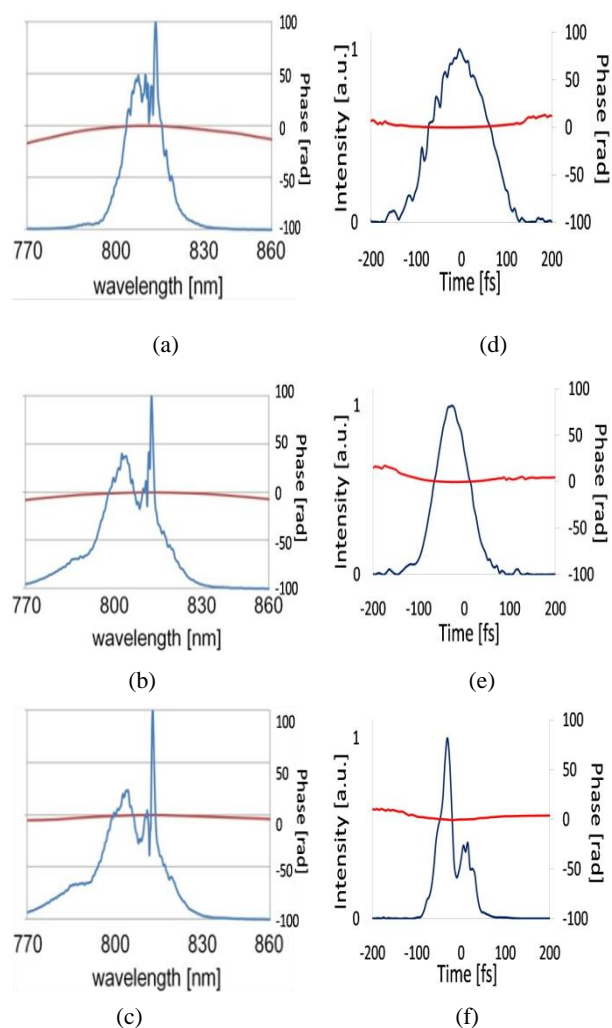


Fig.9 Spectrum intensity and phase at the each reflection of chirped mirrors: (a) three round trips (b)four round trips, and (c)five round trips. (d)Reconstructed temporal waveform and phase of (a). (e)Reconstructed temporal waveform and phase of (b). (f)Reconstructed temporal waveform and phase of (c).

5. まとめ

本研究では広帯域高強度超短パルスの波形測定方法として、新たに構築したSPIDERを用い、中空ファイバによって広帯域化されたパルスの測定を行った。さらに、前置波形整形器とチャープミラーの反射回数の調節により白色光パルスの圧縮も行った。

今後の方針としては、ピークパワーが高いために中空ファイバ内でイオン化が起きているので、ファイバ内のガスをアルゴンガスからイオン化閾値の高いネオンガスに交換することや、ファイバのコア径がより大きいファイバを使用したりする等の対策を行い、より広帯域な白色光パルスの発生を試みる必要がある。

References

- [1] T. Sekiawa *et al*, Nature 432,605(2004)
- [2]M. Dantus *et al*, Chem. Rev., 104, 1813(2004)
- [3] U.Eichmann *et al*. Nature 461, 1261(2009)
- [4] K. W. DeLon *et al*, J. Opt. Soc. Am .B 11, 2206 (1994)
- [5]C. Iaconis *et al*, IEEE J. Quantum Electron.,35, 501(1999)
- [6]R. Trebino *et al*. Rev.Sci. Instrum., 68, 3277(1997)
- [7]近藤昇平, 神成研究室アニュアルレポート, (2010)
- [8]根本寛之, 神成研究室アニュアルレポート,(2009)