

モノサイクル光パルス発生をめざして

森田 隆二・山下 幹雄

Generation of Monocycle Optical Pulses

Ryuji MORITA and Mikio YAMASHITA

5.0-fs (2.4-cycle) optical pulses are experimentally generated using only a spatial light phase modulator (SLM) for nonlinear chirp compensation and are characterized by a frequency-resolved optical gating (FROG). To our knowledge, this is the shortest pulse ever characterized by the FROG. Compression of the ultra-broadband pulse (500–900 nm) from an argon-gas-filled hollow fiber is carried out using a liquid-crystal SLM spatial light phase modulator without any pre-chirp compensation. An appropriate choice of the expansion center wavelength in modulated phase prevents the disadvantage from the discreteness of the SLM and results in better chirp compensation.

Key words: monocycle pulse, ultrabroad-band pulse generation, chirp compensation, frequency-resolved optical gating, spatial phase modulator

モノサイクル光パルスとは、光強度の半値全幅内において光電場が1度しか振動しないような光パルスのことをいう。このような極短光パルスを発生させるために重要なことは、(1) 超広帯域スペクトルを得ること、(2) 群遅延時間（スペクトル位相の周波数に関する微分係数）が周波数に依存しないようにすること（チャープ補償）の2つである。以下では、筆者らのグループが行っているモノサイクル光パルス発生を目指した研究について概説する。

チャープ補償として、プリズムでの前置補償+空間位相変調器（SLM）による補償を用いた実験¹⁾もすでに報告したが、ここでは、SLMのみによる補償実験²⁾について述べる。本研究で用いている超広帯域パルス発生系、チャープ補償光学系ならびにパルス特性測定系を図1に示す。モード同期チタニウムサファイアレーザー増幅器からの光パルス（中心波長～790 nm、パルス幅 30 fs、繰り返し 1 kHz、エネルギー 140 μJ）を、Ar ガス充填ファイバー（コア径 100 μm、長さ 340 mm、気圧 2.8 atm）中で伝搬させると、自己位相変調効果によりスペクトルが 500～900 nm に及ぶ超広帯域光パルスを得ることができる（図2）。この超広帯域パルスを 4-*f* パルス整形系へ通し、チャープ補償を行う。この 4-*f* パルス整形系は、焦点距離 *f*=200 mm の凹面

鏡対と格子定数 $d=1/150$ mm の銀コート回折格子対、およびフーリエ面におかれた SLM（ピクセル幅：97 μm、ピクセル間ギャップ幅：5 μm、階調数：192）からなり、光パルスの各周波数成分ごとに適切な位相を加えることによりチャープ補償を行うことができる。従来、パルス圧縮のためのチャープ補償はプリズム対、回折格子対、チャープミ

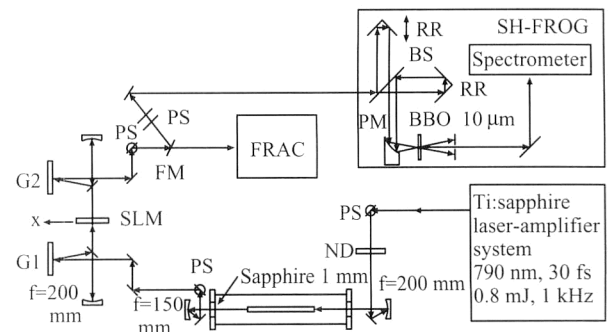


図1 超広帯域パルス発生系、チャープ補償光学系ならびにパルス特性測定系。PS：ペリスコープ、ND：ND フィルター、G1、G2：回折格子、SLM：空間位相変調器、FM：フリッパーミラー、FRAC：フリンジ分解自己相関測定装置、BS：ビームスプリッター、RR：レトロリフレクター、PM：放物面ミラー、BBO：ホウ酸バリウム、SH-FROG：光第二高調波周波数分解光ゲート測定装置。

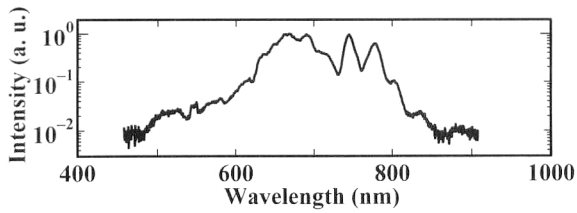


図2 Ar 充填ファイバーにより発生させた超広帯域スペクトル.

ラーや、これらのうちの組み合わせにより行われてきたが、SLM を用いた筆者らの方法は、(i) 各次数の位相分散補償を独立に行うことができる、(ii) 実験に際し光学素子を動かすことなく位相補償の精密調整が可能、(iii) モノサイクルパルス発生を可能とする広い範囲の周波数帯域を有する、などの利点をもつ。発生した超広帯域パルス(図2)をSLMによりチャープ補償して得られた光パルスのフリンジ分解自己相関(FRAC)から、パルス幅は4.1 fs(1.8 サイクル)と見積もられた。このとき、与えるべき位相変調量は、4次までのテイラー展開で近似しており、その補償量は、群遅延分散 -329 fs^2 、3次分散 -748 fs^3 、4次分散 0 fs^4 であった(展開中心周波数に対応する波長 $\lambda_0=800 \text{ nm}$)。

しかしながら、最近、このFRACによる評価は、パルス幅を過小評価する傾向があるとされており³⁾、正確なパルス幅の評価には、周波数分解光ゲート(FROG)や電場直接再構築用スペクトル干渉計(SPIDER)といった電場の振幅・位相を直接的に同時決定する方法を用いる必要がある。本研究でも光第二高調波発生を用いたFROG(SH-FROG)によるチャープ補償パルスの評価を行った。その結果、上述のパルス幅は $\sim 6 \text{ fs}$ と評価された。

SLMは有限のピクセルサイズを有しており、実際に行っている位相補償は離散的でステップ状になる。被圧縮パルスの全スペクトル領域に対してこのステップの高さをなるべく小さくしたほうがよりよいチャープ補償が期待される⁴⁾。理論解析により、圧縮後のサブパルスが最も小さくなるテイラー展開中心周波数(対応波長 $\lambda_0=600 \text{ nm}$)を用い、群遅延分散 -362 fs^2 、3次分散 -100 fs^3 、4次分散 210 fs^4 の補償量を与えた結果が図3である(この際、マージナル補正も行っている)。このときのパルス幅は、 5.0 fs (2.4 サイクル)と評価され(SH-FROGがノンコリニア型であることを補正するとパルス幅 4.7 fs)、これは、現在、FROGにより測定された最短光パルスである。

このほか、本研究では超広帯域測定に適應するSPIDERを作製し、SLMチャープ補償法により、そのパルス幅が 5.0 fs と評価される光パルス(SPIDERで評価された最短

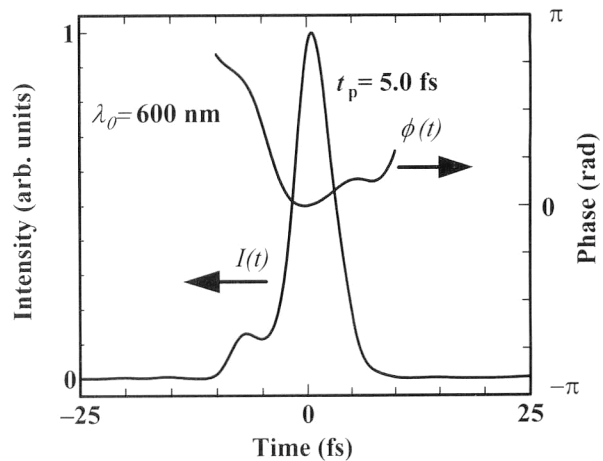


図3 周波数分解光ゲート(FROG)測定結果から再構築されたチャープ補償後の光パルス強度 $I(t)$ および時間領域における位相 $\phi(t)$ 。パルス幅 $t_p=5.0 \text{ fs}$ と評価される。位相補償の展開中心周波数に対応する波長 $\lambda_0=600 \text{ nm}$ 。

パルス)の発生⁵⁾にも成功している。また、筆者らは誘起位相変調効果を用いた700 THz超広帯域スペクトル発生⁶⁾にも成功しており、さらなる少サイクル数光パルス発生・モノサイクル光パルス発生/計測をめざしている。

本研究は、研究代表山下幹雄(北海道大学)のもと、科学技術振興事業団・戦略的基礎研究「サイクル時間域光波制御と単一原子分子現象への応用」において、唐沢直樹氏(現千歳科学技術大学助教授)、森田直志氏(北海道大学)、李黎明氏(千歳科学技術大学助手)、日下哲氏(北海道大学)との共同研究として行っているものである。また、液晶空間位相変調器の開発は、シチズン時計株式会社、勝呂彰氏と共同して行っている。この場を借りて感謝する。

文 献

- 1) L. Xu, L. Li, N. Nakagawa, R. Morita and M. Yamashita: IEEE Photonics Technol. Lett., **12** (2000) 1540-1542.
- 2) N. Karasawa, L. Li, A. Suguro, H. Shigekawa, R. Morita and M. Yamashita: J. Opt. Soc. Am. B, (in printing).
- 3) L. Gallmann, D. H. Sutter, N. Matuschek, G. Steinmeyer and U. Keller: Appl. Phys. B, **70** (2000) S67-S75.
- 4) N. Morita, R. Morita, N. Karasawa, M. Yamashita and H. Shigekawa: CLEO/Pacific Rim 2001, Volume-II (2001) pp. 512-513.
- 5) L. Li, S. Kusaka, N. Karasawa, R. Morita, H. Shigekawa and M. Yamashita: Jpn. J. Appl. Phys., **40** (2001) L684-L687.
- 6) N. Karasawa, R. Morita, H. Shigekawa and M. Yamashita: Opt. Lett., **25** (2000) 183-185.

(2001年4月10日受理)