

# 超広帯域レーザーパルスの偏光整形による差周波混合

## Difference Frequency Generation by Polarization Shaped Super-Continuum Laser Pulses

伊佐文宏 (B4), 藤井 令央 (M1), 廣澤 賢一(助教)

Fumihiro Isa, Leo Fujii, and Kennichi Hirose

### Abstract

We report a novel different frequency mixing (DFM) scheme with vector-pulse shaped supercontinuum (SC) pulses, where DFM is carried out in a type-I nonlinear crystal between the short and the long wavelength bands which are orthogonally polarized each other. Since the two spectral bands can independently be shaped, DFM can flexibly generate tunable mid infrared (MIR) pulses. In a primitive experiment, we generated MIR pulses around 2  $\mu\text{m}$

### 1. はじめに

フェムト秒レーザーは高速性、高強度性といった CW レーザにはない特徴を持っており、また広帯域性を利用した波形整形技術を利用することでフェムト秒レーザーはさまざまな応用に用いられている [1,2]。特に中赤外領域(2-5  $\mu\text{m}$ )は分子の固有振動モードと多く共鳴するため、波形整形された中赤外フェムト秒レーザーパルスは分子制御などに有用である [3]。中赤外領域のフェムト秒レーザーパルス波形整形には、一般的な液晶空間光変調器(LC-SLM: Liquid Crystal Spatial Light Modulator)ではなく、光音響変調器(Acousto-Optic Modulator)や光音響位相分散フィルタ(AOPDF: Acoustic Optic Phase Dispersion Filter)などの変調器を用いて直接周波数変調する方法[4]と、差周波混合や光パラメトリック変換で波形整形した短波長パルスを波長変換によって中赤外パルスに変換する間接的な方法[5]に分類される。直接波形整形では波形整形器全体の

スループットが低く、また整形できる波長領域は位相変調器特性に制限される。一方、間接的波形整形法では信号光の波形を出力の高い変換光パルスに転写するためスループットは高いが、2つの光源が必要になる。

本研究では増幅された比較的強度の高いフェムト秒レーザーパルスを用い、Ar ガスを封入した中空ファイバにより超広帯域化させ、その短波長側(600-660 nm)と長波長側(880-940 nm)を変換効率の高い type-I BBO 結晶を用いて差周波混合を行うことで、中赤外パルスを発生させた。本手法では1つの光源で中赤外パルスの発生と波形整形を行うことが可能である。また、差周波混合におけるシグナル光とポンプ光の両方に LC-SLM を用いた波形整形器で周波数変調を与えることができるため、中赤外パルスの波形整形も可能となる。ただし、type-I 位相で整合には差周波発生を行う波長成分の偏光が直交している必要があるため、我々は波形整形器のフーリエ面に波長板を挿入して実現した。

### 2. Ar ガス封入中空ファイバを用いた広帯域短パルス発生

Fig. 1 に中空ファイバを用いた自己位相変調 (SPM: Self Phase Modulation) による広帯域パルス発生の設定アップを示す。CPA からのパルスはビームスタビライザによって集光スポット位置を安定した状態で、焦点距離 500 mm のレンズを用いて、コア径が 126  $\mu\text{m}$ 、長さが 40 cm の中空ファイバに集光させた。

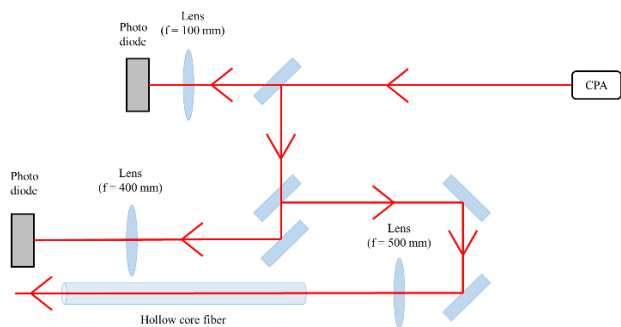


Fig. 1 Schematic of supercontinuum pulse generation using an Ar-filled hollow core fiber.

本実験では、超広帯域パルス内で差周波混合を行い  $2 \mu\text{m}$  帯の中赤外パルスを生じさせるため、 $600\text{--}940 \text{ nm}$  の基本波波長帯域が必要である。そこで、中空ファイバの非線形性を高くするために、Ar ガスのガス圧を  $230 \text{ kPa}$  に設定し、Fig. 2 に示すようにパルスを広帯域化させた。このとき、入射したレーザパルスは、繰り返し周波数  $1 \text{ kHz}$ 、平均パワー  $340 \text{ mW}$  の出射後のパワーは  $60 \text{ mW}$  で透過率は  $18\%$  であった。

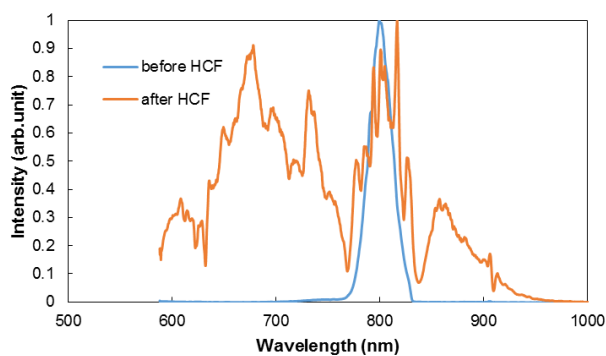


Fig. 2 A typical spectrum of supercontinuum pulse compared with the launched laser pulse.

### 3. 広帯域パルス波形整形

Fig. 3 に広帯域パルス波形整形用の光学セットアップを示す。広帯域パルス用  $4f$  波形整形器は、適当な角度分散を得るため、また透過率を上げるためにプリズムを用いている。フーリエ変換には凹面ミラー( $f=660\text{mm}$ )を用いた。

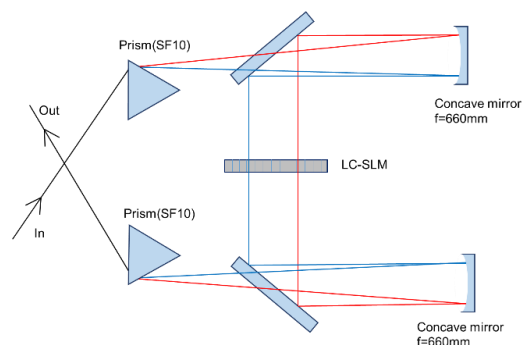


Fig.3 Setup of a  $4f$  pulse shaper.

本実験のセットアップでは回折格子ではなく、プリズムを用いているため、プリズムによる材料分散が付加される。この分散を周波数干渉法(SI : Spectral Interferometry)を用いて計測した。一方、中空ファイバ伝播時に付加される分散を SPIDER(Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction)を用いて計測した。それらを合わせると、波形整形器後の位相は Fig. 4 のようになった。ちなみに、プリズム対による材料 2 次分散は  $3700 \text{ fs}^2$  と見積もられ、計測結果と比較的良好一致が得られた。ただし、プリズムの 3 次分散も軽視できず、また、中空ファイバ後のスペクトルもきれいな 2 次分散にはなっていない。また、このときの波形整形器出射後のパワーは  $19 \text{ mW}$  であり、透過率は  $31\%$  であった。

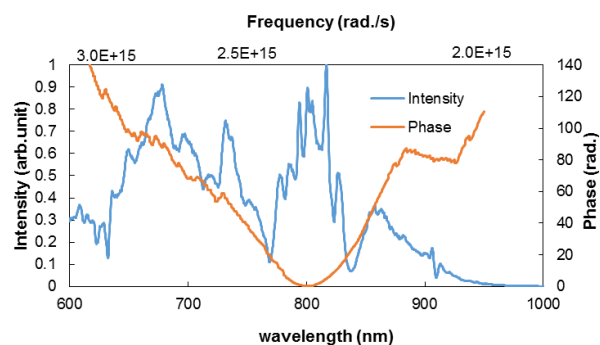


Fig.4 Spectrum intensity and phase of supercontinuum pulse after the  $4f$ -pulse shaper measured by SI and SPIDER.

#### 4. 中赤外フェムト秒パルス発生

Fig. 5 に広帯域パルスを用いた差周波混合の実験光学系セットアップを示す。SLM 後に配置された半波長板によって Fig. 6 のように広帯域パルスの長波長側(880-940 nm)の偏光方向は  $90^\circ$  回転し、短波長側(600-660 nm)の偏光方向と直交させた。差周波混合に用いる結晶は厚さ 1.0mm の type-I BBO 結晶である。位相整合条件は比較的広帯域であり、用いた広帯域パルスに対して波長ごとに位相整合調整は不要である。

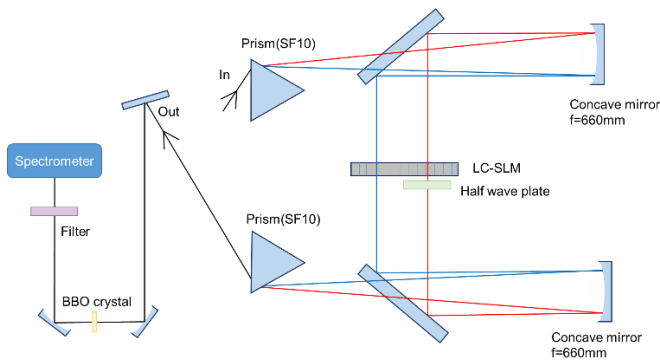


Fig.5 Optical layout of DFG experiment.

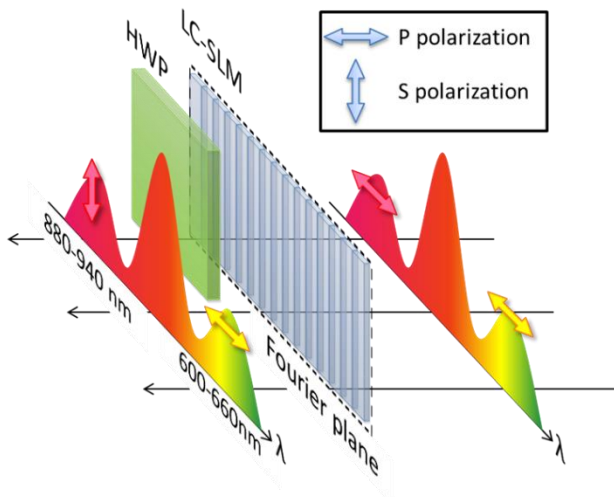


Fig. 6 The principle of MIR pulses generation in a supercontinuum pulse with polarization shaping.

前章で計測した位相を周波数で微分することで

群遅延時間を求めると Fig. 7 のようになった。この計測では 2 次群速度分散特性を示すのはスペクトルの中心部分に限られてしまうが(この点については再計測が必要である), この中心波長帯域(770-850 nm)の直線的群遅延特性を全波長帯域に当てはめると Fig. 8 のオレンジの直線のようなようになった。この全波長帯域に当てはめた位相と実験で計測した位相を比較すると Fig. 9 のようになった。

また, Fig. 6 で長波長側に置いた半波長板による遅延時間を考慮に入れると, 長波長側のスペクトルは Fig. 7 の青色直線のような群遅延特性になり, 差周波発生が可能になる。

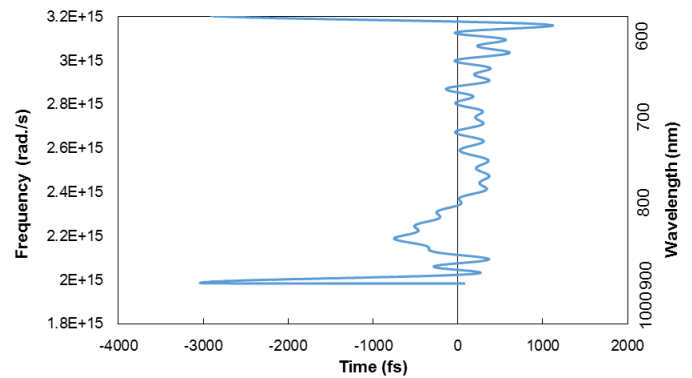


Fig.7 Group delay distribution obtained from the spectral phase in Fig. 4.

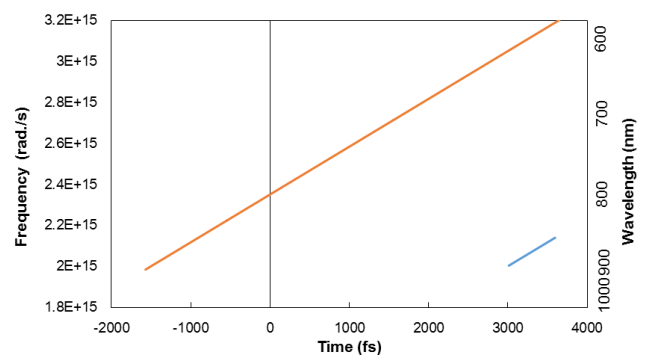


Fig. 8 Approximated group delay dispersion (GDD) in a SC pulse. A blue line shows the GDD when a half-wave plate is placed at the Fourier plane.

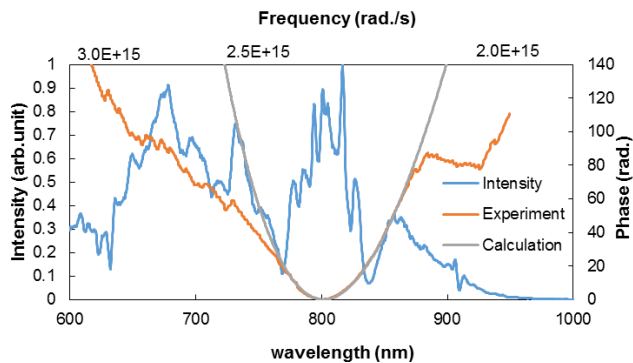


Fig. 9 Difference of experimentally measured spectral phase and that assumed in our discussion.

また、Fig. 10 のように SLM によってさらに時間遅延を加えることにより、長波長帯域と短波長帯域の周波数差は変化し、発生する中赤外パルスの波長を変化させることができた。このときに短波長側にそれぞれ 100,-100 fs の時間遅延を加えて発生したものを Fig. 11 に示す。短波長側に正の時間遅延を加えることによって、中赤外パルスは長波長側へ波長を変化させることができた。同様に短波長側に負の時間遅延を加えることによって、中赤外パルスは短波長側へ波長を変化させることができた。

また、長波長側に時間遅延をかけることによって、発生する中赤外パルスの波長を変化させることができた。

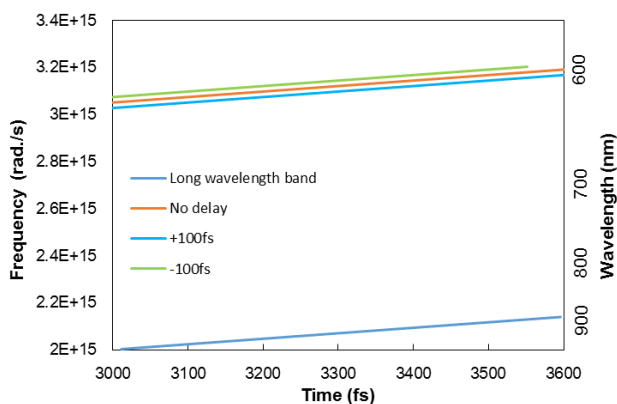


Fig. 10 GDD shift added by SLM to realize tunable DFG.

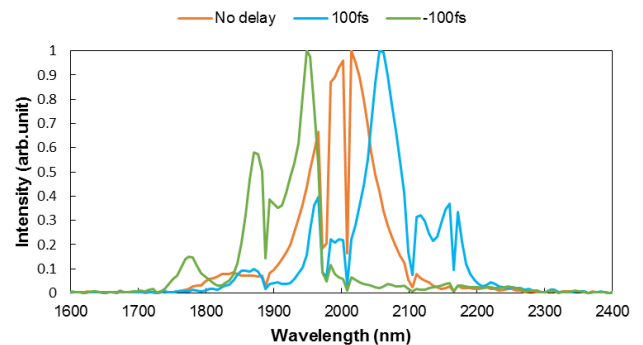


Fig. 11 The result of generated MIR pulses by controlling time delay in SC pulses.

## 5. まとめ

本研究では新しい中赤外パルスの発生と波形整形を行うコンパクトな手法の実証を試みた。希ガス封入中空ファイバを用いた広帯域パルス発生実験では、Ar ガス封入中空ファイバを用いて、SPM を起こすことによって、超広帯域パルスを発生させることができた。また、広帯域パルス波形整形器ではプリズムを用いることにより透過率が高くなり、また凹ミラーを用いることにより、色分散をつけずに波 4f 光学配置の波形整形器を構築することができた。差周波混合では厚さ 1mm の type-I BBO 結晶を使用することによって、広帯域位相整合光学系を構築せずに高効率の位相整合が実現し、中赤外パルスを発生させることができた。また、波形整形器内で時間遅延を加えることにより、波長可変の中赤外パルスを発生させることができた。ただし、GDD 特性と中赤外パルスとの対応については精度の高い追実験が必要である。

## References

- [1] H. Rabitz, et.al., Science, 292, 709 (2001).
- [2] M. Shapiro, et.al., Chem. Phys. Lett., 126, 541, (1986).

- [3] Q. Peng, A. Juzeniene, J. Chen, L. O. Svaasand, T. Warloe, K. E. Giercksky and J. Moan, Rep. Prog. Phys. 71, 056701 (2008).
- [4] J. W. Wilson, et. al., Opt. Express, 15, 8979 (2007).
- [5] T. Brixner, et. al., Appl. Phys. B., 88, 519 (2006).