

誘起位相変調を用いた 400 nm 帯 Super-continuum 光パルスの発生と 2 倍波パルス圧縮 Generation of a Super-continuum around 400 nm by Induced Phase Modulation and Pulse Compression of the Second Harmonics

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 pulses around 400 nm by induced-phase modulation (IPM) and designed a second harmonic pulse sharper with a MEMS-SLM to compress the entire broadband pulses. Super-continuum pulse generated by IPM is significantly broadened than that generated by SPM alone. However, the beam profile of the second harmonic pulse shows some low-order multimodes.

1. はじめに

フェムト秒レーザーの波形整形技術は高次の分散補償[1]に用いられる他に、分子制御[2]や量子制御[3]などの応用がある。特に近年の波形整形技術の発展は著しく、様々なニーズに応じて自由に波形整形できるようになった。例えば振幅と位相の同時波形整形に2次元波形整形器を利用した方法[4]や、高分解能の1次元波形整形器を利用した方法[5]が報告されている。また、偏光に着目した波形整形は2001年T. Brixnerらが報告したのをはじめ[6]、様々な方法が提案されている[7,8]。

整形パルスの波長帯域に着目すると近赤外以外の波長帯域を波形整形する研究も数多く行われている。しかし、ここで問題となるのは波形整形器の帯域である。最も一般的な波形整形器であるLC-SLM(Liquid crystal spatial light modulator)は可視域～近赤外域の波長帯域以外は動作しない。また、AOM(Acousto-optic modulator)による波形整形器は遠紫外域の波形整形がすでに報告されているものの波長帯域は狭い[9]。近赤外域で波形整形した後波長変換する間接的な波形整形も報告されている[10]。ただし、この方法も広帯域で波長変換する結晶や波長が限られるため必ずしも完璧ではない。

新たに注目されているのがMEMS-SLM(Micro electro mechanical system micro mirror array SLM)による波形整形

である[11]。MEMS-SLMはアルミミラーがアレイ状に配列をしているため許容波長帯域はアルミミラーの波長帯域、すなわち遠紫外域から赤外域と広い波長帯域で波形整形が可能となる。

中空ファイバを用いた自己位相変調(SPM)さらには短波長レーザーを同時入射したIPM によるsuper-continuum (SC) 光パルスの発生は、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た。

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/IPMによる広帯域フェムト秒レーザーパルス発生の光学系のセットアップを示す。800 nm帯の白色光発生の条件を最適化した結果、本実験ではコア径が300 μm 、長さが105 cmの中空ファイバを使用した。中空ファイバにはアルゴンガスを17kPa～500kPa まで調節することができるようにした。

まず基本波は入射せず、SPMによるガス圧変化に伴うスペクトルと透過率の変化を行った。Fig.2 に光学系を示す。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ため基本波の時と同様にHeNeレーザーによるガイド光を設けてアライメントを行った。

結果をFig.3とTable.1に示す。ガス圧の増加に伴いスペクトルの広帯域化が確認されたが透過率は120kPaでは45%まで低下した。この原因としてはビームプロファイルの低下が考えられる。Fig.4に中空ファイバ後のビームプロファイ

を示すが、明らかにビームプロファイルが悪いことがわかる。波長400 nmでは、長さ100 cmでは、基本モード以外のモードの減衰が十分ではないことがわかる。

続いてガス圧が150 kPaの時のSPMとIPMの2倍波スペクトルの変化をFig.5に示す。この時、基本波は490 μ J スペクトル幅は25 nm 時間幅は59 fs 集光サイズは水平方向が200 μ m、垂直方向200 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。この結果から2倍波も基本波の時と同様、IPMによりSPM以上の広帯域化が得られた。また、一方、透過率は48%(230 μ J \rightarrow 110 μ J)と改善しているもののやはりFig.4に示すビームプロファイルの問題により、基本波と比較して20%程度低い結果となった。

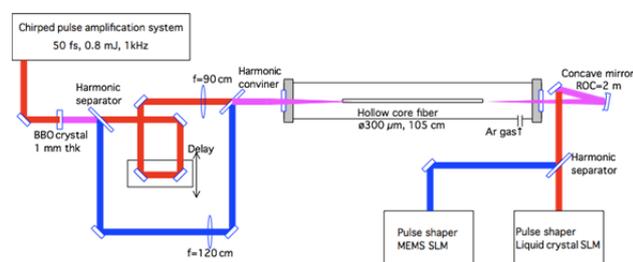


Fig.1 Schematic for IPM experiment.

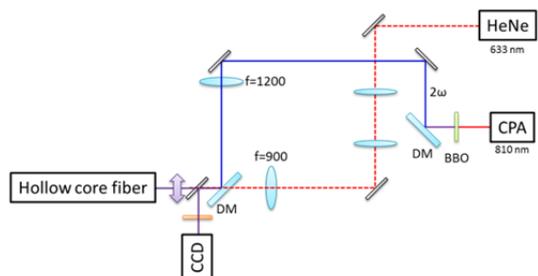


Fig.2 Setup of spectrum broadening experiment using an Ar-gas-filled hollow core fiber.

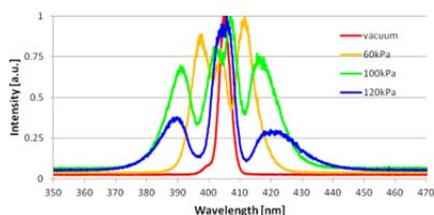


Fig.3 Spectra for second harmonics light at various Ar gas pressures.

Table1 The efficiency of second harmonics light transmission in the HCF.

	input power [μ J]	output power [μ J]	efficiency [%]
vacuum	140	86	61.4
40kPa	140	85	60.7
60kPa	140	82	58.6
80kPa	140	78	55.7
100kPa	140	75	53.6
110kPa	140	70.5	50.4
120kPa	140	62	44.3

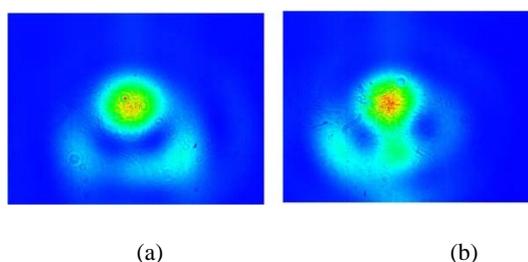


Fig.4 Beam profile after the HCF at (a)vacuum (b)120kPa Ar.

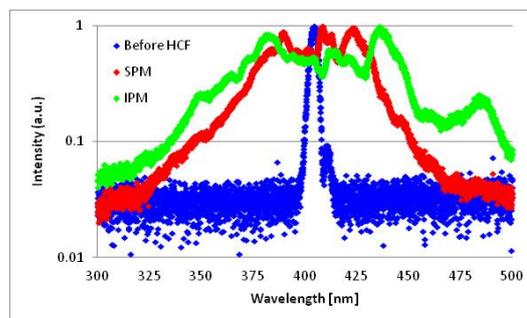


Fig.5 The result of Spectrum for SPM and IPM

3. MEMS-SLM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りSC光パルスが発生後、基本波と2倍波でそれぞれパルス圧縮を行った。まず、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、2倍波はFig.6に示したように150 groove/mmの回折格子と焦点距離150 mmのシリンドリカルレンズで2f系を構築した後にMEMS-SLMに入射した。MEMS-SLMはわずかに傾けているため反射光は高さを下げながらグレーティングに戻る。

本実験で使用したMEMS-SLMについて述べる。本実験ではFraunhofer社製の240 \times 200ピクセルMEMS-SLMを使用した。1ピクセルのミラーサイズは40 \times 40 μ mであり、最大移動距離は800nm、ミラーの反射率は可視域で90%以上である。なお、本波形整形器は波長帯域を300 \sim 500nmに設定し

ていて、回折格子の溝数とシリンドリカルレンズの焦点距離からこの波長帯域でのフーリエ面におけるビーム幅を算出すると約6.0mmとなり150ピクセルに相当する。

また、本実験で使用したMEMS-SLMは動作のduty比は5%に保つ必要があるため、CPAからのパルスが光チョッパーによって間引かなければいけない。その概要をFig.7に示す。MEMS-SLMの動作時間を5msに設定したためCPAからの光パルスを1kHzから10Hzにしなければいけない。そこで光チョッパーにより10.2Hzに間引いた。Fig.7の2個のパルスジェネレータは左がCPAからの信号をduty比が50%の信号に変換するために設け、右が光チョッパーからの光パルスとMEMS-SLMのONタイムを一致させるディレイとして設けた。

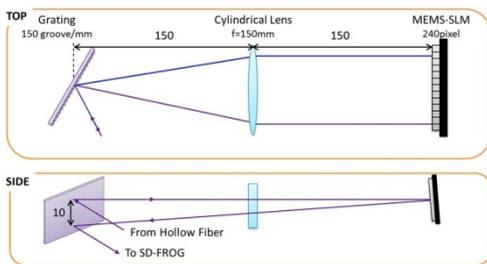


Fig.6 Schematic of a broadband second harmonics pulse shaper.

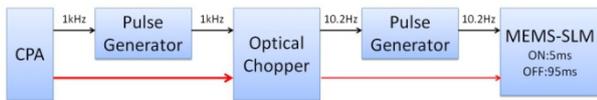


Fig.7 Synchronization diagram for MEMS-SLM.

4. SD-FROGによるパルス波形計測

2倍波のパルス波形計測用にSD-FROG(Self Diffraction Frequency Resolved Optical Gating)を構築した。SD-FROGは3次の非線形効果である光カー効果による自己回折を利用したレーザパルスの周波数振幅および位相のワンショット測定技術であり、Fig.8にそのセットアップを示す。自己回折光はシグナルパルスとは異なる方向に出射するので、PG-FROGのように偏光板などによってゲートをかける必要はない。このため、主としてSD-FROGは材料分散・吸収などの制限がある紫外領域のレーザパルス評価に有力な手法である。自己回折光のレーザ波面にシグナルパルスの各時間遅延部分の情報がのるのはPG-FROGと同様である。発生した自己回折光はPG-FROGと同様に、グレーティ

ングによって周波数成分に分解される。これを CCD によって測定することでFROG 画像を得る。

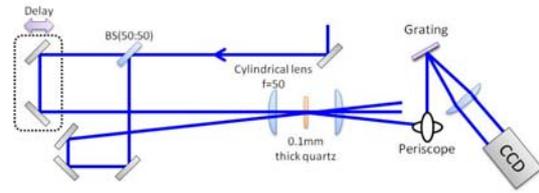


Fig.8 Schematic of a Self Diffraction FROG for the measurement of intense 400 nm femtosecond laser pulse

5. まとめ

本研究では誘起位相変調を用いたSC光パルスの発生および2倍波波形整形用光学設計を行った。SPMによるガス圧変化に伴うスペクトルと透過率の変化を調べた結果、スペクトルの広帯域化は確認されたがビームプロファイルが悪く、低い透過率となった。HCFの400nm帯のマルチモード伝播特性から条件を改良する必要がある。一方、IPMによるSC光パルスの発生はSPMと比べ広い波長帯域が得られたが、やはり透過率は基本波と比べ20%程度低い結果となった。一方、2倍波波形整形用光学設計およびMEMS-SLMとCPAパルスの同期は完了した。

今後は、ビームプロファイルの改善およびMEMS-SLMによる位相変調を確認後、実際に2倍波波形整形を試みる。

References

- [1] H. Rabitz, et.al., Phys. Rev. A, **70**, 043404 (2004).
- [2] H. Rabitz, et.al., Science, **292**, 709 (2001).
- [3] M. Shapiro, et.al., Chem. Phys. Lett., **126**, 6, 541, (1986).
- [4] K.Nelson, et.al., Opt. Lett., **30**, 3,323,(2005).
- [5] A. Bartels, Opt.Express, **15**,8979,(2007).
- [6] T. Brixner et. al., Opt. Lett., **26**, 557 (2001)
- [7] L. Polachek, et. al., Opt. Lett., **31**, 631(2006).
- [8] S. M. Weber, et. al., Appli. Opt., **46**, 5987 (2007).
- [9] J.W.Wilson, et. al., Opt. Express, **15**, .8979,(2007).
- [10] T.Brixner, et. al., Appl. Phys. B., **88**, 519 (2006).
- [11] A.Gehner, et. al., Appl.Phys.B,**76**, 6,711(2003).