

希ガス封入中空ファイバを用いた誘起位相変調による

超広帯域フェムト秒光パルスの発生

Supercontinuum pulse generation using induced-phase modulation (IPM)

in a rare gas-filled hollow core fiber

植田隆太(B4), 伊佐文宏(M2), 肥田遼平(B4), 鈴木敬和(M1)

Ryuta Ueda, Fumihiko Isa, Ryohei Hida, Takakazu Szuki

Abstract

We generate supercontinuum (SC) pulses by induced phase modulation (IPM) with 800 and 400-nm laser pulses in a rare gas-filled hollow core fiber to spread the time window of our imaging system SF-STAMP. We achieved a SC pulse ranging from 350 to 980 nm by compensating for the second-order dispersion of an incident 800-nm laser pulse.

1. はじめに

フェムト秒レーザを誘電体媒質に入射させることで、非線形光学効果を起こし広帯域光を発生でき、高次高調波発生やアト秒パルス発生に必要な数サイクル領域パルス発生も可能となる。我々の研究室ではこれまでに、線形周波数チャープした広帯域光パルスを用い、1パルスでサブピコ秒の時間分解でコマ撮りイメージングできる手法 (STAMP[1]およびSF-STAMP[2]) を開発した。この手法では、より広帯域な光パルスを用いることで、比較的少ないチャープ量で容易にイメージングの計測時間窓を広げることができる。

広帯域化の手法として、希ガス封入中空ファイバにレーザパルスを集光して起こす3次非線形光学効果の自己位相変調(SPM)[3-5]や誘起位相変調(IPM)[6-7]がある。この手法では、固体媒質の損傷閾値を超える高強度パルスを用いた広帯域化が可能である。また、ファイバ自体が空間モードフィルタとして働き、ビーム品質を高めることもできる。帯域幅を増やすには、パルスを高強度化し、中空ファイバ内のガス圧を高めれば良い。しかし、この時、希ガスがイオン化してしまうことにより、空間的な

フィラメンテーションを起こし、透過効率の低下やビーム品質の低下を起こす。

今回、我々は基本波と2倍波(SH)を時間的、空間的に一致させ中空ファイバに入射させるIPM実験を行い、透過効率を抑えた超広帯域光発生を試みた。我々のフェムト秒レーザパルスは1 mJ以下の出力であることから、中空ファイバに封入する希ガスとして、一般に用いられるArに、より非線形効果の高いKrを混合させた。また、中空ファイバ入射前の工学系の材料分散量が、基本波と2倍波は異なることから、基本波の分散補償を調整し更に広帯域化した白色光発生を試みた。

2. Ar とガスの混合ガスを用いた超広帯域光発生

CPAからの中心波長800 nm、平均強度2 W、繰り返し周波数1 kHz、時間幅50 fs (FWHM)のレーザパルスをて用いた。Fig. 1にセットアップを示す。CPAからのパルスを、厚さ2 mmのType I BBO結晶に入射し、中心波長400 nmのSHGを発生させた。この時、透過後の基本波は600 mW、2倍波は150 mWであった。Type I BBO結晶に正常光を入射

するので、出射後は基本波が正常光、2倍波が異常光となる。そこで基本波の偏光を半波長板で回転させて、基本波と2倍波の偏光を揃えた。

中空ファイバは長さ 39 cm, コア径が 126 μm を使用した。基本波は $f=400\text{ mm}$, 2倍波は $f=500\text{ mm}$ のレンズで集光し、この時、集光点のビーム径は、基本波と2倍波共に $79 \times 96\ \mu\text{m}$ となった。

Fig. 2 に Ar のガス圧を変化させた時の広帯域化の変化を示し、Table 1 にその時の基本波と2倍波の透過効率を示す。広帯域光を分光測定する際に、3台の分光器(600~100nm:Avantes, Avaspec-2048-SPU, 450~600 nm: Ocean Photonics, HR-4000, 300~500 nm: Ocean Photonics, HR-2000)を使用して測定をした。

本実験では連続した超広帯域光発生を目的としており、2倍波のスペクトル幅が 20 nm であるので、2倍波から発生する SC スペクトルの長波長側が広がるようにコンプレッサ間距離を微調整している。

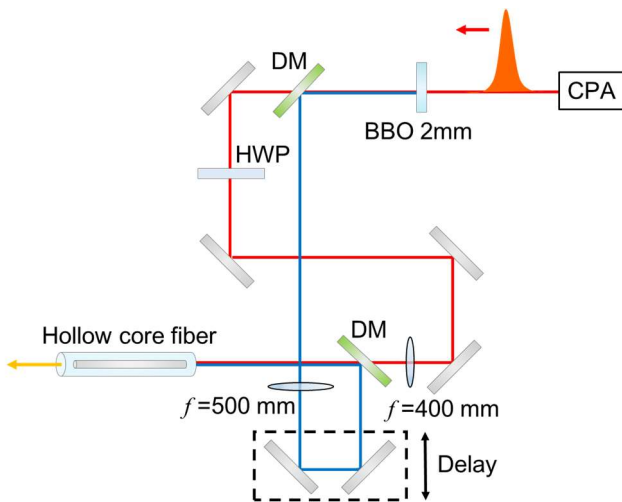


Fig.1 Experimental setup of IPM

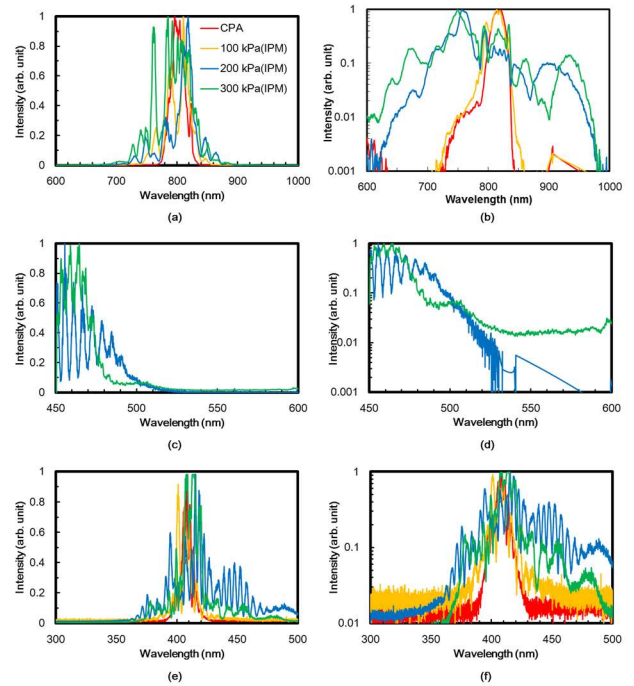


Fig.2 The spectra of IPM using Ar. (a)600~1000 nm in linear scale.(Avaspec-2048-SPU) (b)600~1000 nm in log scale.(Avaspec-2048-SPU) (c) 450~600 nm in linear scale.(HR4000) (d) 400~600 nm in log scale.(HR4000) (e) 300~500 nm in linear scale.(HR2000) (f) 300~500 nm in log scale.(HR2000)

Table.1 The intensity of SC pulse after IPM and transmission efficiency when changing gas pressure of Ar.

ガス圧(kPa)	基本波		2倍波	
	出射強度(mW)	透過効率(%)	出射強度(mW)	透過効率(%)
100	190	31.7	31	20.7
200	180	30	20	13.3
300	160	26.7	23	15.3

この結果より、Ar では広帯域化幅が比較的狭く可視域のスペクトルを連続して発生させることが出来なかった。原因は、基本波パワーが低いためであり、SHG を行わずに全強度を入射すれば広帯域化は実現できる。そこで、Ar よりも非線形定数の高い Kr を用いて同様の実験を行った。Fig.3 にスペクトル、Table.2 に透過効率を示す。

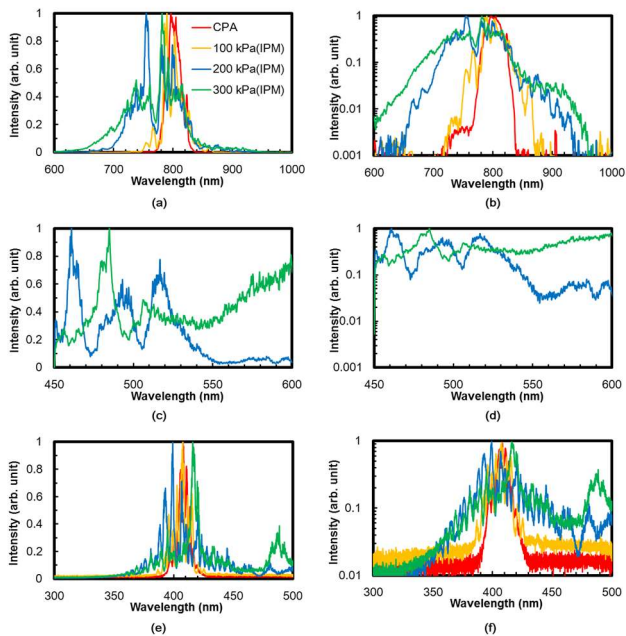


Fig.3 The spectra of IPM using Kr. (a)600~1000 nm in linear scale.(Avaspec-2048-SPU) (b)600~1000 nm in log scale.(Avaspec-2048-SPU) (c) 450~600 nm in linear scale.(HR4000) (d) 400~600 nm in log scale.(HR4000) (e) 300~500 nm in linear scale.(HR2000) (f) 300~500 nm in log scale.(HR2000)

Table.2 The intensity of SC pulse after IPM and transmission efficiency when changing gas pressure of Kr.

ガス圧(kPa)	基本波		2倍波	
	出射強度(mW)	透過効率(%)	出射強度(mW)	透過効率(%)
100	170	28.3	29	19.3
200	135	22.5	23	15.3
300	100	16.7	20	13.3

Ar よりも非線形定数の高い Kr を用いることで 350~980 nm の広帯域化を達成した。しかし、非線形定数が高くなったことにより、3次非線形光学効果のカー効果が強まり、Ar の時よりもビームが集光され、プラズマ発生によるイオン化が発生しやすくなった。その結果、ビームが発散し透過効率を低下させてしまった。

そこで、Ar と Kr を混合させることにより、3次

の非線形光学効果を制御し、広帯域光を発生させつつも、透過効率を維持出来るように最適化を行った。Ar ガスの効果は、電子との弾性衝突によって電子温度を低くすることにある。Ar と Kr の混合比率を変化させた時のスペクトルの変化を Fig.4 に示し、透過効率を Table.3 に示す。

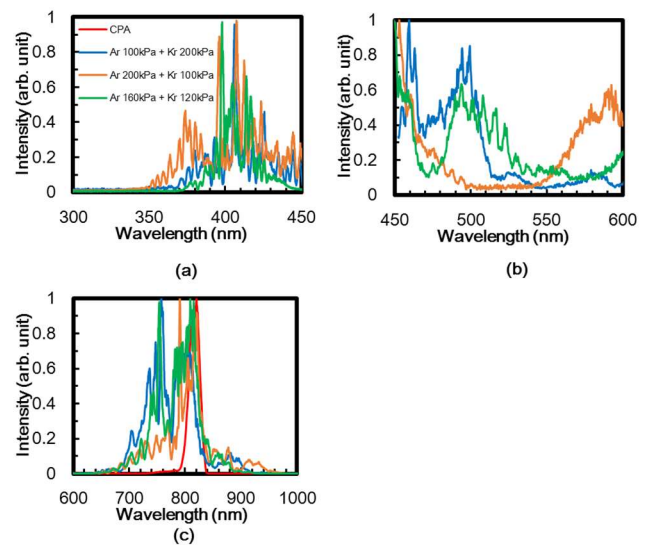


Fig.4 The spectra of IPM using Ar and Kr. (a) 300~450 nm in linear scale.(HR2000) (b) 450~600 nm in linear scale.(HR4000) (c) 600~1000 nm in linear scale.(Avaspec-2048-SPU)

Table.3 The intensity of SC pulse after IPM and transmission efficiency when changing gas pressure of Ar and Kr.

ガス圧(kPa)	基本波		2倍波	
	出射強度(mW)	透過効率(%)	出射強度(mW)	透過効率(%)
Ar100 kPa+Kr200 kPa	123	20.5	20	13.3
Ar200 kPa+Kr100 kPa	156	26	22	14.7
Ar160 kPa+Kr120 kPa	150	25	22	14.7

この結果により、Ar 200 kPa と Kr 100 kPa の時に 350~1000 nm と最も広帯域化できた。また、この時透過効率の低下を抑えることが出来た。

3. 基本波の分散補償による超広帯域光発生法の改善

Fig.1 のセットアップからわかるように、基本波と2倍波の光路の分散量はそれぞれ異なる。そして、2倍波が広帯域化するようにCPAのパルス圧縮器を調整したため、CPAからのパルスはフーリエ限界パルス(FTL)ではない。中空ファイバ後のSPMで基本波と2倍波が最も広帯域化するようにコンプレッサの回折格子間距離を調整したところ、両者には1145 fs²の差があった。そこでこの差を減らすように、基本波に負分散を与えられれば、両者のパルスをFTLで入射させられ、更なる広帯域光を起こせるのではないかと考えた。Fig.5のように基本波に-50 fs²/bounceの分散補償鏡を用いたセットアップで実験を行った。

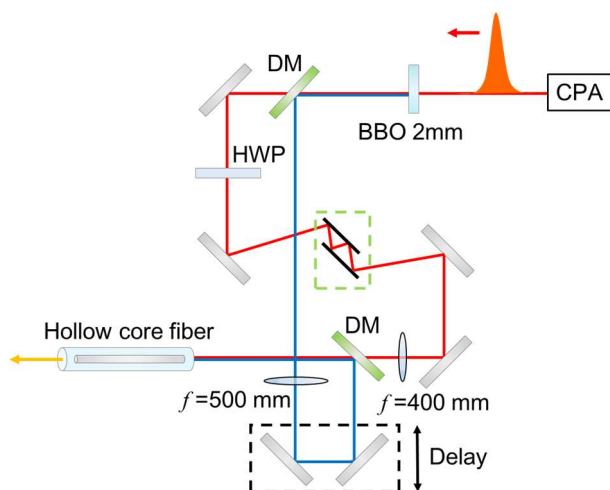


Fig.5 Experimental setup of IPM after compensating second dispersion by chirped mirror.

この時の分散補償鏡の反射回数と広帯域化の関係を Fig. 6 に、透過効率を Table 4 に示す。ガス圧は Ar 200 kPa と Kr 100 kPa の混合ガスを用いて実験を行った。

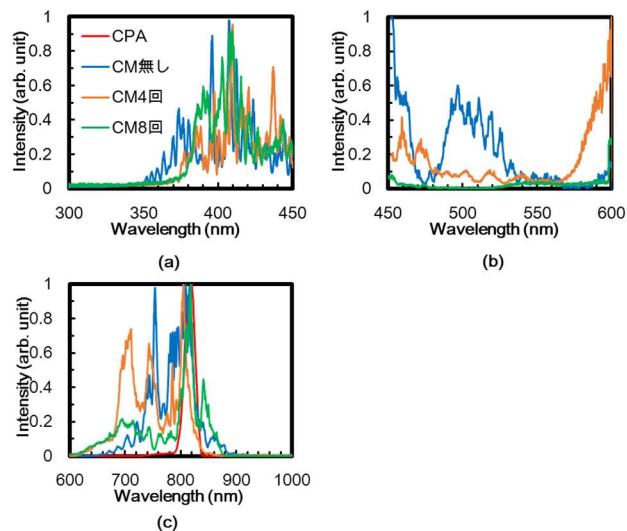


Fig.6 The spectra of IPM after compensating second dispersion using mix gas(Ar160 kPa and Kr120 kPa). (a) 300~450 nm in linear scale.(HR2000) (b) 450~600 nm in linear scale.(HR4000) (c) 600~1000 nm in linear scale.(Avaspec-2048-SPU)

Table.4 The intensity of SC pulse after IPM and transmission efficiency when changing the number of bounce of chirped mirror

反射回数	基本波			2倍波		
	入射強度(mW)	出射強度(mW)	透過効率(%)	入射強度(mW)	出射強度(mW)	透過効率(%)
0	675	150	22.2	160	22	13.8
4	600	70	11.7	76	15	19.7
8	500	63	12.6	77	13	16.9

この結果より、分散補償鏡が無い時に比べ、使用した時の方が可視域の広帯域化が観測された。しかし、分散補償鏡の反射率が98%程となり、分散補償量と基本波の入射強度がトレードオフになっている。それにより、-200 fs²(4 bounce)の時に広帯域化幅が最大となり、完全に基本波パルスの分散補償が達成されていない。

4. まとめ

今回、我々は1パルスでサブピコ秒の時間分解でコマ撮りイメージングできる手法(STAMPおよびSF-STAMP)の計測時間窓を広げる為に、400-900 nm

帯の連続した超広帯域光を得ることを目的として実験を行った。

そして、Ar と Kr の混合ガスを使用することで、従来の単一ガスを用いる場合に比べ、350~980 nm という超広帯域光発生を達成しつつも、高透過効率で白色光発生を行えた。

また、基本波が FTL でないことに注目し、基本波の分散補償を行い、350~1000 nm の白色光発生を行えた。

Morita, H. Shigekawa, and M. Yamashita, "Experimental generation of an ultra-broad spectrum based on induced-phase modulation in a single-mode glass fiber," *Opt. Commun.* **162**, 256–260 (1999).

References

- [1] K. Nakagawa, a. Iwasaki, Y. Oishi, R. Horisaki, A. Tsukamoto, a. Nakamura, K. Hirose, H. Liao, T. Ushida, K. Goda, F. Kannari, and I. Sakuma, "Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)," *Nat. Photonics* **8**, 6-11 (2014).
- [2] T. Suzuki, *et al.*, "Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) utilizing spectral filtering," *Opt. Express* **23**, 30512–30522 (2015).
- [3] F. Shimizu, "Frequency Broadening in Liquids by a Short Light Pulse," *Phys. Rev. Lett.* **19**, 1097–1100 (1967).
- [4] R. H. Stolen and C. Lin, "Self-phase-modulation in silica optical fibers," *Phys. Rev. A* **17**, 1448–1453 (1978).
- [5] R. R. Alfano and P. P. Ho, "Self-, cross-, and induced-phase modulations of ultrashort laser pulse propagation," *Quantum Electron. IEEE J.* **24**, 351–364 (1988).
- [6] E. Matsubara, K. Yamane, T. Sekikawa, and M. Yamashita, "[154] Generation of 2.6 fs optical pulses using induced-phase modulation in a gas-filled hollow fiber," *J. Opt. Soc. Am. B* **24**, 985 (2007).
- [7] L. Xu, N. Karasawa, N. Nakagawa, R.