

# 希ガス封入中空ファイバによるフェムト秒円偏光パルス圧縮 Pulse compression in gas-filled hollow fiber with circularly polarized pulses.

根本寛之(B4)

H. Nemoto

## Abstract

Pulse broadening in gas-filled hollow fiber followed by pulse compression using a pair of chirped mirror is demonstrated with polarized femtosecond laser pulses. Because of its lower e-field amplitude compared with linear polarization. We also demonstrate pre-shaping of the laser pulses launched into hollow fiber to increase the spectral broadening to compress pulse only with pair of chirped mirror

## 1 はじめに

近年、高次高調波発生[1],粒子加速[2]、分子科学[3]等というフェムト秒物理を用いた高強度物理研究がさかんに行われている。これらの研究ではピーク強度が高い領域で実験を行うため、高強度広帯域フェムト秒パルスが重要である。このようなパルスを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[4]がある。

この手法は希ガスを封入した中空ファイバにパルスを伝播させ、自己位相変調をおこしスペクトルを広げ、その後分散を補償することによりパルス幅を短くする技術である。同様なことは石英ファイバで起こすことが可能であるが、中空ファイバを使用することでは高エネルギーパルスで行えることが特徴である。

しかし、中空ファイバ圧縮でも mJ を超える数サイクルパルスを出力することは困難である。この原因は入射端で発生する、自己集束、イオン化によりビーム品質の低下、透過率の低下、中空ファイバの損傷が起こるためである。これを防ぐ方法として入射端を真空にしたガス圧勾配中空ファイバ[5]、入射端の面積を増加させる平面導波路[6]、偏光を円偏光に変えて入射する[7]等が報告されている。今回、我々は他の方法より簡易にできる円偏光入射で解決を試みた。

直線偏光パルスを円偏光に変換すると最大電界強度は直線偏光の $1/\sqrt{2}$ 倍になる。非線形効果、イオン化はパルスエネルギーではなく、最大電界強度に依

存響する。そのため最大電界強度が低くなる円偏光を使用すれば、自己収束、イオン化を抑えられ問題を解決できるという原理である。

別の問題としてパルスの高次分散の問題がある。中空ファイバ圧縮では一般的に分散補償はチャープミラーで2次分散を取り除くのみであり、高次分散は残っている。これを取り除く方法としてチャープミラー後に波形整形器を設置することが行われている[8]。しかし、この方法では多大なエネルギーロス、時空間結合の問題が発生するため応用には使用するのは困難になってしまう。そこで我々はこのような問題を解決するために増幅器前置き型波形整形器を使用し中空ファイバに入射するパルスの位相を制御することにより解決を試みた

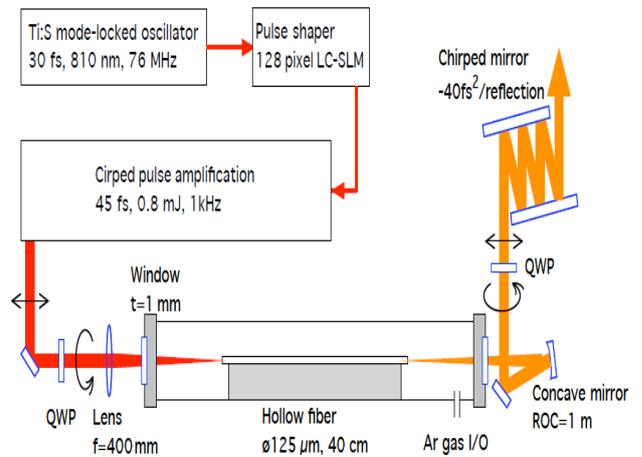


Fig.1 Experimental setup of pulse compression in gas-filled hollow fiber with circularly polarized QWP: quarter wavelength plate

## 2 実験

実験装置は Fig.1 である。Ti:sapphire 発振器から発振された fs パルスを LC-SLM により手動操作で位相制御し、チャープパルス増幅器(CPA)に入射している。増幅器後のパルスは直線偏光なので0次 $\lambda/4$ 波長板で円偏光に変換している。変換したパルスを

レンズで適切なスポットサイズに集光し Ar が封入した中空ファイバに入射している。出射パルスを 0 次  $\lambda/4$  波長板により直線偏光にもどし、チャープミラーにより 2 次分散を補償する。

我々はまず円偏光の効果を確認するために直線偏光と円偏光での中空ファイバの透過パワー、スペクトルの広がり等のデータを測定した。次に前置き型波形整形器により、中空ファイバに入射するパルスの位相制御し出力するスペクトルを測定した。最後に中空ファイバに入射するパルスの位相を制御することで出射後の位相を制御し、チャープミラーのみ場合でも高次分散を取り除きパルス幅の最適化が可能であるか試みた

### 3 実験結果

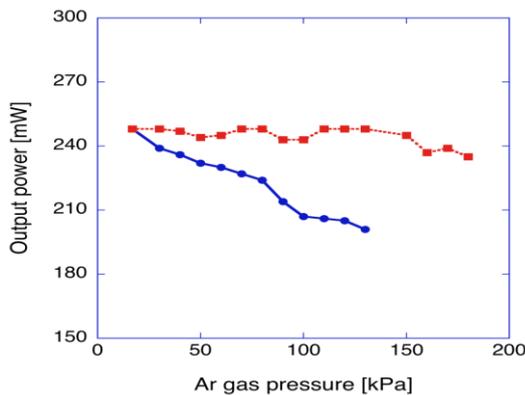


Fig.2 Measurement of output pulse energy as a function of gas pressure for linearly polarized (solid line) and circularly polarized(dashed line) beam pulse

Fig.1 は直線偏光、円偏光での透過パワーの比較である。この実験時の入射パルスパラメータはパルスエネルギー 600  $\mu\text{J}$ 、パルス幅 45 fs、集光ビーム直径 80  $\mu\text{m}$ 、集光強度、 $2.6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  である。このグラフをみると直線偏光はガス圧を増加させると透過パワーは減少しており、さらに 90 kPa 付近で大きなパワーの減少が見られた。円偏光の場合はガス圧を増加させても透過パワーはほとんど変化していなかったが 160 kPa 付近で大きなパワーの減少が見られた。直線偏光、円偏光どちらも大きくパワー落ちた部分では出力ビームにおいてビームの分裂が発生していた。また、円偏光の最大電界強度は直線偏光の  $1/\sqrt{2}$  であるのでビームの分裂

が起こるガス圧が円偏光でより高い圧力で起こることが妥当だと言える。次に透過パワーを測定と同時に測定した出力スペクトルを Fig 2 に示す。

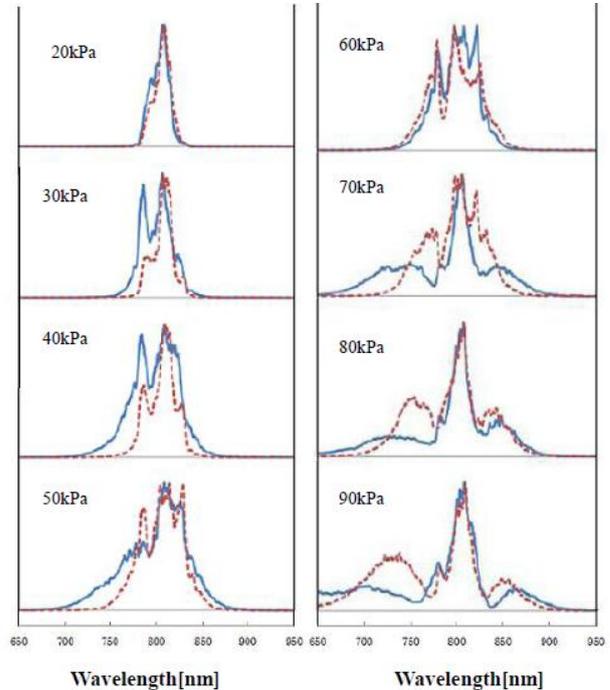


Fig.3 Measurement of spectrum evolution at different gas pressure for linearly polarized (solid line) and circularly polarized(dashed line) beam pulse

これらの結果を見ると、円偏光は非線形効果が抑えられるのでスペクトルの広がり直線偏光に比べ広がらない結果になっている。しかしガス圧を増加させ、80kPa を超えると直線偏光に比べて遜色なく、充分パルス圧縮の結果が期待できる結果になっている。またこの結果をみると自己位相変調が発生しているのにもかかわらず、810nm 付近のパワーが突出したままである。これは前置き型波形整形器を使用したことにより、CPA の入射するパワーが低下し、ASE が残っているためである。

これは今後解決しなければならない課題である。

また出力を円偏光から直線偏光に変換する際の変換効率も 95% 以上であり、充分使用できる水準である。

この結果から高エネルギーで中空ファイバ圧縮する場合、直線偏光で行うより円偏光の方が有利であることが分かる。

次に位相制御を行い、3 次分散をパルスに加えて中空ファイバに入射した結果を Fig4 に示す。この実験時

の入射パルスパラメータはパルスエネルギー680  $\mu\text{J}$ ,パルス幅 45 fs,集光ビーム直径 80  $\mu\text{m}$ ,集光強度, $2.9\times 10^{14}$   $\text{W}/\text{cm}^2$ ,ガス圧 100kPa で行った。

この実験結果をみると負の三次分散を加えるとスペクトルの広がりが増える傾向が見られ、正の三次分散を加えるとスペクトルの広がりが増進される傾向がみられる。しかしながら、正の三次分散を大きく加

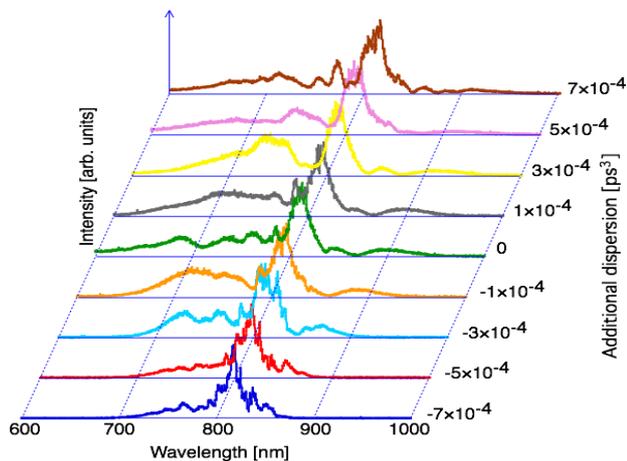


Fig 4 Measurement of spectrum evolution at different third-order dispersion of incident pulse

えるとスペクトルの構造が複雑になり、圧縮に向かないためある程度で抑えるのが得策であると考えられる。

使用した中空ファイバの伝播で加わる三次分散は  $20\text{fs}^3$  程度であり、加えた三次分散に加えて僅かな量であることを考慮すると中空ファイバの分散を補償した結果ではなく、正の三次分散がスペクトルの広がりが増進させていることが理解できた。

最後に中空ファイバに入射するパルスの分散を制御することで、チャープミラーのみの場合でも高次分散を取り除き、パルス幅の最適化が可能か試みたが、

実験は失敗した。中空ファイバに入射するパルスの分散を変化させると出射後に位相だけでなくスペクトルも同時変化する複雑な構造になっている。そのため、手動で圧縮後のパルス幅の最適化を行うことが困難であったことが失敗の原因である。

## 4 まとめと今後の方針

直線偏光と円偏光の透過パワー、スペクトルの広がり測定した結果により、直線偏光より円偏光の方が高エネルギーでの中空ファイバ圧縮に適していることが確認できた。次に入射パルスの位相を制御することにより正の三次分散はスペクトルの広がりが増進することが理解できた。

今後の方針として、まず CPA での ASE を抑えるように改良し、手動ではなく適応制御による位相制御を導入し、チャープミラーのみの場合でも高次分散を取り除きパルス幅最適化可能か試みる。

## References

- [1] T. Sekiawa et al, Nature **432**,605(2004)
- [2] J. Poustie et al, Opt. Lett. **17**, 574 (1999)
- [3] K. Yamanouchi, Science, **295**, 1659 (2002)
- [4] U.Eichmann et al. Nature **461**, 1261(2009)
- [5] M.Niosoli et al, Opt. Lett., **22**, 522, (1997)
- [6] A.Suda et al, Appl.Phys.Lett **86**, 111116(2005)
- [7] J.Chen et al. Opt.Lett **33**, 2992(2008)
- [8] X.Chen et al. Opt.Lett **34**, 1588(2009)