

差周波発生のための高非線形性フォトニック結晶ファイバーによる波長シフト WAVELENGTH SHIFTING WITH HIGH NONLINEARITY PHOTONICS CRYSTAL FIBER FOR DIFFERENCE FREQUENCY GENERATION

川瀬啓悟[#], 羽島良一, 森道昭, 永井良治

Keigo Kawase[#], Ryoichi Hajima, Michiaki Mori, Ryoji Nagai

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

As the project of the Basic Foundation Research on the ministry education, culture, sports, science and technology – Quantum Leap Flagship Program, we are conducting the research on basic technologies for a high repetition attosecond pulse source driven by a free electron laser (FEL) collaborating with National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Kyoto University, Nihon University and High Energy Accelerator Research Organization. In this project, a carrier to envelope phase (CEP) stabilized mid-infrared light source is necessary to stabilize the CEP of the FEL. This light source is required to have the repetition frequency of about 20 MHz and the output energy of a few tens milliwatts. To meet these requirements, we are developing the mid-infrared light source based on the difference frequency generation driven by an ytterbium doped fiber laser system. For this purpose, the Raman-shifted soliton-pulse generation with highly nonlinear photonic crystal fiber (HN-PCF) is adopted. The present experimental situation and numerical evaluations for the response of the HN-PCFs are reported in this paper.

1. はじめに

近年、高強度短パルスレーザー技術を用いた中赤外パルスによって、数 keV に至る高次高調波(HHG)アト秒 X 線パルスの発生が報告されている[1]。一方、電子加速器を用いた自由電子レーザー(FEL)は中赤外パルス発生の発振器として、固体レーザーよりも高出力・高繰り返し化への物理的障壁が低く、将来的に HHG の駆動光源のひとつとして期待できる。FEL を HHG の駆動光源とするためには、中赤外パルス内の光位相(キャリアエンベロープ位相, CEP)が安定である必要があるが、通常の FEL はノイズ起源のためそれは安定ではない。その安定化は外部から CEP 安定パルスをシードすることで FEL を動作させることにより可能となることが、羽島・永井により提案されている[2]。FEL 出力の CEP 安定化を実現することを目指して、FEL シードのための CEP 安定中赤外光

源を開発している。

CEP 安定中赤外光源として、これまでに先行研究があるイッテルビウム(Yb)ファイバーレーザーを基礎とした差周波発生光源を開発している[3-5]。これは、数 W 程度に増幅した数百 fs のパルスを2つに分離し、一方を高非線形性フォトニック結晶ファイバー(HN-PCF)で長波長側にラマンシフトしたソリトンパルスを発生させ、もう一方の Yb ファイバーレーザーパルスと非線形結晶で差周波発生させることで中赤外パルスを発生させるというものである。開発するシステムのプロットを Fig. 1 に示す。

2. 装置開発の現状

これまで日本加速器学会年会にて、Yb ファイバーレーザーシステムの構築とその特性評価について報告した[6, 7]。このレーザーシステムで発生させた波長 1.03 μm で出力 2 W、繰り返し数 23.5 MHz、パルス幅数百 fs のパルスを HN-PCF へ導入した。この時、FORC 社製の HN-PCF-1040 および HN-PCF-800 の2つの異なる HN-PCF を試験した。前者は非線形係数 $10 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 、分散パラメータ $20 \text{ ps nm}^{-1}\text{km}^{-1}$ で長さ 2 m、後者は非線形係数 $90 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 、分散パラメータ $100 \text{ ps nm}^{-1}\text{km}^{-1}$ で長さ 2 m の HN-PCF である。ここで非線形係数はそれぞれゼロ分散波長である 1040 nm、800 nm におけるカタログ値、分散パラメータは 1040 nm におけるカタログ値である。

HN-PCF からの出力光のスペクトルは最大 1500 nm に至ることを確認した(Fig. 2)。しかしながら先行研究とは異なり、入力パルス強度に対して単一波長で波長シフト量が単調増加する傾向は見られず、広がったスペクトルを持つ結果で、パルス列での強度変動も大きいものであった。これは2種の HN-PCF に対して共通する結果である。

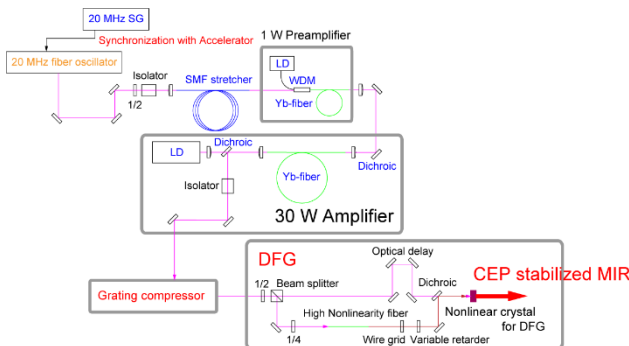


Figure 1: Schematic drawing of the CEP stabilized midinfrared radiation source based on difference frequency generation using HN-PCF.

[#] kawase.keigo@qst.go.jp

レーザーシステムの構成を見直した結果、発振器内に用いていた分散補償用の回折格子対の格子間隔がゼロ分散設計の 600 line/mm ではなく、300 line/mm であることが判明した。そこで現在では、別途構築された出力強度が安定な 8 MHz の発振器に置き換え、波長シフトおよび差周波発生試験を進めている。

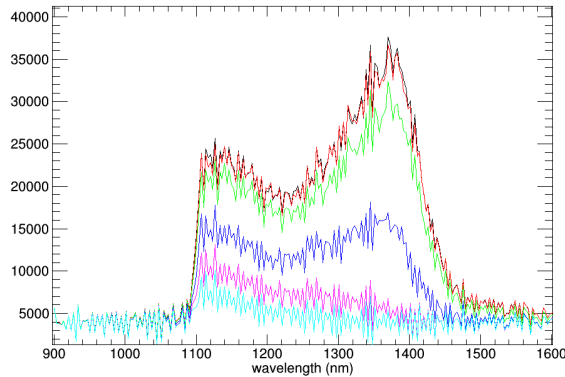


Figure 2: Result of wavelength shifted spectra from the HN-PCF-1040. The input power increases from light-blue line to black one up to 2 W. These spectra were produced by driving with an input intensity fluctuated largely.

3. 計算コードによる波長シフト評価

現在利用しているレーザーシステムと所有の HN-PCF で必要とするラマンシフトを得るための条件を最適化するために、計算コードによる評価を実施した。ラマン効果を含む非線形効果を考慮したファイバー中での光電場の伝播は、非線形シュレーディンガー方程式と呼ばれる微分方程式で記述でき、その数値計算については Split-step Fourier Method と呼ばれる方法が利用される[8]。理論的な詳細は参考文献にあるのでここでは省略するが、重要なパラメータとしては、入力光パルスの時間幅とパルスのピークパワー、ファイバーの非線形係数と GVD パラメータ(あるいは分散パラメータ)であり、これらはソリトン次数(soliton order)というパラメータで取り扱われる。実際の計算コードは昨年度の年会の発表で紹介されていたものを用いた[9, 10]。

3.1 HN-PCF-1040 の場合

実験ではまず HN-PCF-1040 を用いて波長シフトの観測を進めたので、このファイバーについての計算コードによる評価を実施した。Figure 3 にパルス幅 300 fs のパルスを 2 m の HN-PCF-1040 に通した時の出力パルススペクトルについて、入力パワーを変化させた時の応答スペクトルを示す。数個の波長成分を持つパルスが生成され、入力強度に従ってシフト量が増加する。次に入力パルス幅依存性を Fig. 4 に示す。傾向としてパルス幅が小さいほど、発生する波長の成分が少ない。これは、時間的にも孤立したパルス数が少ないことを意味している。

Figure 5 はファイバー長を変えた時の出力スペクトルの変化を示している。計算した領域においてシフト量はおおよそファイバー長に比例した増加を示している。

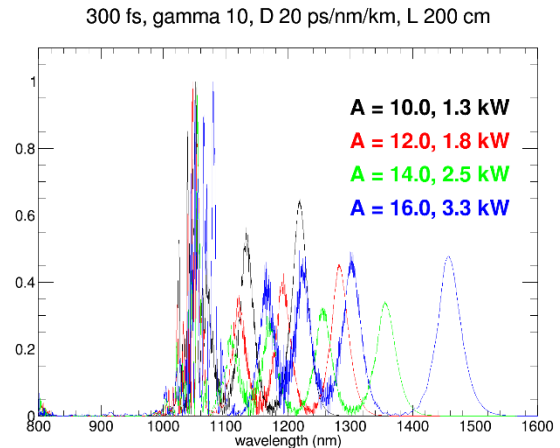


Figure 3: Input power dependence of the output of HN-PCF-1040.

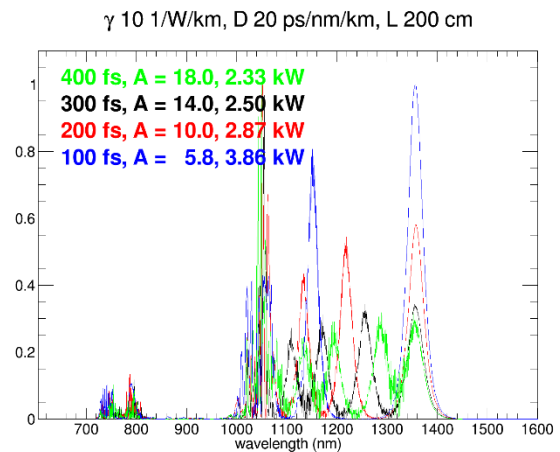


Figure 4: Input pulse duration dependence.

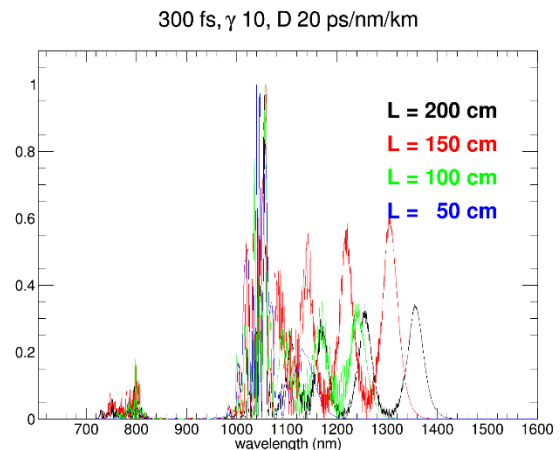


Figure 5: Fiber length dependence.

3.2 HN-PCF-800 の場合

次に非線形係数と分散パラメータが大きい HN-PCF-

800 に対する計算評価も実施した。これを用いることで、より短いファイバーでも十分な波長シフトを得ることが期待できるからである。ここではファイバー長 30 cm に対して主に計算を実施した。Figure 6 に出力スペクトルの入力ピークパワー依存性を示す。この結果より、低いパワーで必要な波長シフトが得られるが、スペクトル幅は前項よりも広い。Figure 7 はこのファイバーの長さを変えた時の出力スペクトルの計算結果を示している。1 m を超えるものを用いた場合、計算では 0.86 kW の入力で 1800 nm を超えるシフトと評価される。またソリトン次数を 11 に固定してパルス幅を変えた時の出力スペクトルを Fig. 8 に示す。

3.3 計算結果とこれまでの実験結果および先行研究との比較および問題点

実験では HN-PCF への平均入力パワーを 2 W まで上げることで 1400 nm 程度までの波長シフトを得ている。これは現在のところ 23.5 MHz および 8 MHz と同程度の結果である。実験における入力効率、HN-PCF 出力をロングパスフィルターに通して 1040 nm の成分を除去して測定した時にパワー入出力比は最大で 0.25 程度であると評価している。この入力効率に対して 300 fs の入力パルス幅を仮定すると、入力ピークパワーはそれぞれ 66.5 kW、196 kW となり、上述の計算結果を大幅に超過する。

一方、先行研究[4]では入力パルス幅 150 fs、パルス繰り返し数 125 MHz、入力平均パワー 500 mW で 1675 nm の波長シフトを得ている。この時のシフトした光の出力平均パワーは 75 mW であると報告されており、入出力パワー比は 0.15 である。この時の入力ピークパワーは 25 kW に相当し、パワー比 0.15 が入力効率と仮定すると、実効的な入力ピークパワーは 3.75 kW となり、前述の計算結果と比較的よい一致を示している。このことから、上記の入出力パワーをもとにした定量的な比較は妥当な手法であると考えられる。

これまでの実験結果と今回実施した計算結果との間には、1 - 2 桁の差異がある。この差異の説明は現状では難しい。現在実施している 8 MHz の発振器を用いた HN-PCF の波長シフトの実験では、回折格子対によるコンプレッサーを導入し、HN-PCF の出力波長シフト量が最大となるようにパルス幅を調整しており、1 桁以上入力パルス幅が伸長しているとは考え難い。実際、自己相関計測では 100 fs 程度のパルス幅であると評価されている。また、23.5 MHz の発振器を利用していた時には最短 200 fs 程度の自己相関図形も顕著なテール構造を示すことはなかったもので、パルス幅が大きく伸長していたとは考え難い。HN-PCF の非線形係数はカタログ値を参照しており、実際の値はわからない。しかしながらこのパラメータも入力パワーに対して線形にしか依存しないため、大きく変わらない限り強い影響はない。非線形係数は非線形屈折率を実効断面積で割ったものであるから[8]、800 nm と 1040 nm との差は非線形屈折率が変わらないと仮定すると 1:1.7 の比率となり、HN-PCF-800 の時に用いた値である 90 は 1040 nm では 53 程度であると評価できる。そのためパワーに対する影響はファクター2程度である。

以上、現状の実験結果を入力パワーについて計算結果と比較した時の差異についての解釈はまだ説明できないが、上記で言及した要素について複合的に考慮することまでには至っておらず、よりこれらの実験条件や計測結果を精査することが今後の課題である。

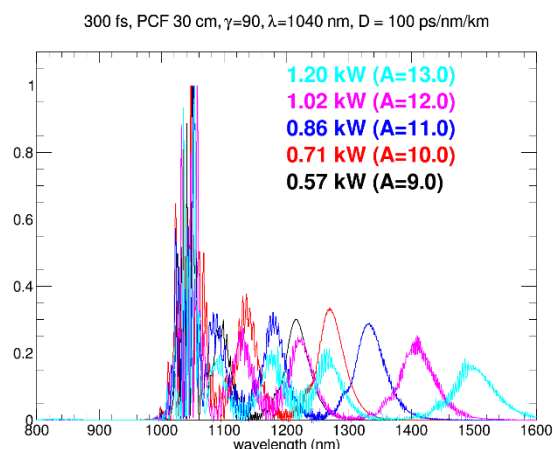


Figure 6: Input power dependence of the output of HN-PCF-800.

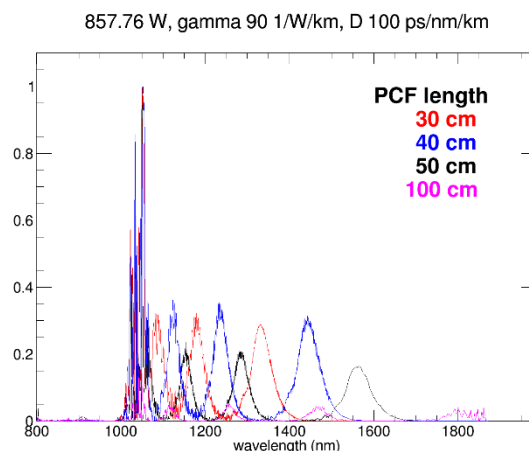


Figure 7: Fiber length dependence.

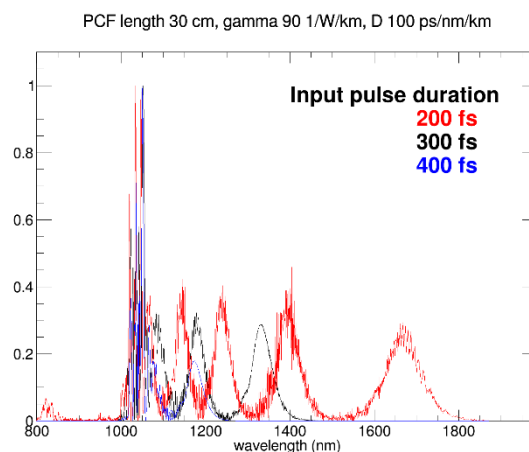


Figure 8: Input pulse duration dependence.

4. まとめ

本研究では HN-PCF ヘモード同期 Yb ファイバーレーザーパルスを導入し、長波長側にシフトさせた光パルスの発生について、特に HN-PCF への入力パラメータに対する出力スペクトルの変化について、計算コードを用いて評価した。比較的波長スペクトルに対しては実験結果と類似した結果を得ている一方、実験条件における入力パワーと計算で評価される入力パワーに大きな差異が存在している。先行研究の結果を見積もった結果、それほど大きな差異はないことが示唆されているので、現在の実験条件をさらに精査することで、計算との定量的な一致を得ることができると期待している。

謝辞

本研究は文部科学省平成 30 年度光・量子飛躍フラッグシッププログラム次世代レーザー基礎基盤研究「自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒光源のための基礎基盤技術の研究」(課題番号 JPMXS0118070271)の下で実施している。

参考文献

- [1] T. Popmintchev *et al.*, Science 336, 1287 (2012).
- [2] R. Hajima and R. Nagai, Phys. Rev. Lett. 119, 204802 (2017).
- [3] T.W. Neely *et al.*, Opt. Lett. 36, 4020 (2011).
- [4] G. Soboń *et al.*, Opt. Lett. 42, 1748 (2017).
- [5] L. Jin *et al.*, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. vol. 24, no. 3, 0900907 (2018).
- [6] K. Kawase *et al.*, “キャリアエンベロープ位相安定中赤外光源の検討”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 - Aug. 3, 2019, pp. 780 - 782.
- [7] K. Kawase *et al.*, “差周波中赤外光源のためのファイバーレーザーの開発”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 268-271.
- [8] G.P. Agrawal, Nonlinear fiber optics, 6th edition. Academic press, 2019.
- [9] M. Sato *et al.*, “パルスラジオリシスシステム高度化へ向けたスーパーコンティニューム光源開発”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep. 2-4, 2020, pp. 272-274.
- [10] A. A. Rieznik; <http://freeopticsproject.org>