

キャリアエンベロープ位相安定中赤外光源の検討

PREPARATION OF PAPERS FOR ACCELERATOR CONFERENCES

川瀬啓悟[#], 羽島良一, 永井良治
Keigo Kawase[#], Ryoichi Hajima, Ryoji Nagai
QST

Abstract

Career-envelope phase (CEP) stabilized seeding is necessary to generate the attosecond x-ray pulse via higher order harmonics generation driven by a mid-infrared free electron laser (FEL). To realize the seeding for an FEL, we are developing a mid-infrared light source based on a difference frequency generation between the light pulse of the fiber laser and its wavelength shifting. We report the overview of the CEP stabilized mid-infrared light source for seeding an FEL oscillator, and the present situation of the fiber laser development.

1. はじめに

極短時間科学研究のツールとして、レーザーパルスと希ガスとの相互作用による高次高調波発生 (HHG) のアト秒 X 線パルス生成の研究が、近年盛んに実施されている。これまでに、光パラメトリックチャープパルス増幅 (OPCPA) による波長 3.9 μm で 10 mJ の中赤外パルスの高圧の He ガス中での導波路伝播での HHG により、最大 1.6 keV の X 線パルスの生成が報告され、長波長レーザー駆動の有効性が示されている[1]。現在の HHG の研究では、主にその最終段として固体媒質を用いたチタンサファイアレーザーあるいは OPCPA を採用しているが[2]、その限界は高繰り返しと長波長化にある。しかしながら自由電子レーザー(FEL)の場合、原理的に結晶の透過性の問題などと無縁であり、これを用いた HHG の研究が提案されている[3]。FEL においても、数サイクルパルスの生成も実証されており[4]、電子ビームの増強や光共振器の最適化により、高強度中赤外光源として固体レーザーを超える可能性を持ち合わせている。さらに超伝導空洞の利用で MHz の CW 運転も可能であり、これで HHG を駆動することで固体レーザーでは到達しえない高強度・高出力光源の可能性がある。

高繰り返しで安定な HHG の発生にはドライブパルスのキャリアエンベロープ位相(CEP)安定性が必要である。FEL は一般にノイズで立ち上がるので、CEP 安定化にはノイズ強度を十分に上回る程度の出力の CEP 安定シード光を FEL へ入力する必要がある。具体的には 20 MHz でパルス幅 200 fs 程度、10 – 20 mW 程度の中赤外パルス光源が必要となる[3]。そこで FEL の波長可変中赤外 CEP 安定化シード光源として、ファイバーレーザーをもとにした差周波発生中赤外光源の開発を開始した。同じレーザー発振器から光を分けて片方を波長変換し、両者の差周波混合をとると CEP は原理的に自動的に安定化される。このような光源は近年 Yb ファイバーや Er ファイバーレーザーを用いて開発研究が進められており[5-8]、商用化も進められている[9-11]。前述の通り波長 3.9

μm による駆動で HHG の最大到達エネルギー 1.6 keV という報告があるので、より長波長化に対応できる光源、具体的には 4 μm 以上が開発目標である。また FEL へのシード光として利用することから、加速器高周波信号との同期は必須である。このような背景のもと、現在、20 MHz 程度の繰り返しの Yb ファイバー発振器を構築し、その特性評価と増幅器への入力試験を実施している。本発表では、これらの開発検討の現状について報告する。

2. 装置開発の現状

2.1 全体設計

中赤外を差周波で発生させる上で広く用いられている非線形結晶は LN(LiNbO₃)や KTA(KTiOAsO₄)であるが、ともに 5 μm より長い波長は透過できない[12]。そのためより長い波長を得るために、AgGaSe₂(AGSe)などの非酸化物系の非線形結晶の利用[8]も視野に入れて検討している。しかしながら AGSe の問題は 1030 nm では位相整合がとれない領域があることである[13]。一方、1500 nm 以上では広い差周波領域で位相整合がとれるので、Er アンプの利用も視野に入れる。

差周波発生のためには 2 色の光を用意する必要があるが、多段 OPA は複雑そうなので避けたいので、ここでは高非線形性ファイバーによるラマンシフトソリトン生成による波長シフトを用いる手法[5-7]を検討している。そこで現在想定している中赤外光源のレイアウトは Fig. 1 に示す通り、5 μm までは高出力の報告がある[7]LN と Yb ファイバーレーザーとの組み合わせによる差周波発生で対応し、より長波長ではソリトンシフトを用いて 1.5 μm の光を生成して Er/Yb ファイバーでアンプし、再度ソリトンシフトさせて AGSe で差周波発生を発生させるという 2 系統を検討している。

現在までのところ、Yb ファイバーレーザーの発振器を構築し、それを用いた増幅器試験を実施している段階である。以下、発振器および増幅器についての現状をまとめる。

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

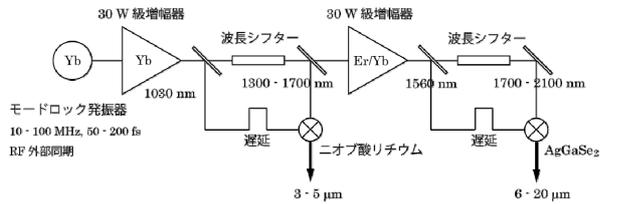


Figure 1: Schematic layout of the mid-infrared light source based on the difference frequency generation (DFG).

2.2 発振器

Yb 発振器は広く用いられている設計を採用している [14-18]。これまでに 20 MHz 周辺の繰り返しで 2 台の発振器を試作し、ともにモードロック動作の自己開始を確認している。発振器の概略図を Fig. 2 に示す。そのうち 1 台目を日大船橋に移設し、別の関連した研究のために利用している。2 台目は差周波光源開発用に出力の特性評価を継続実施するとともに、増幅器へ導入している。

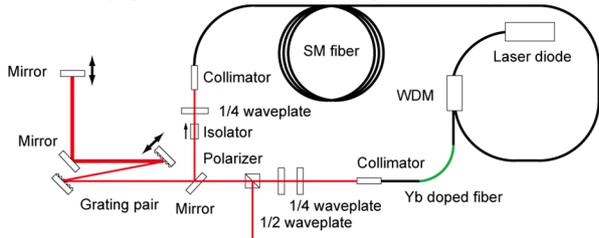


Figure 2: Schematic drawing of an oscillator.

2 台目の発振器の構成は次の通りである。Yb ファイバー(Yb1200-4/125, Thorlabs Inc.)は 40 cm、追加のシングルモードファイバー(1060XP, Thorlabs Inc.)が 5 m、励起用レーザーダイオード(LD)と Yb ファイバーを結合する WDM(HPFWDM9803-01-NNN-BBB-1, Optizone)からのシングルモードファイバーが合わせて 2 m、ピグテール付きのコリメータ(CFS5-1030-FC, Thorlabs Inc.: FC コネクタは切断)からのシングルモードファイバーが合わせて 1 m、以上が発振器光路中のファイバーであり、すべて融着接続されている。波長板は有効径 10 mm のもので 1/2 波長板 1 枚、1/4 波長板 2 枚を用いている。発振器内の分散補償のための回折格子対は 600 groove/mm のものを利用し、アイソレータは中心波長がずれているけれども、最大ビーム径 2.3 mm のもの(IO-2.5-1064-VLP, Thorlabs Inc.)を利用している。光の取り出しと発振器内の偏光状態を固定するために偏光ビームスプリッターキューブ(PBS103, Thorlabs Inc.)を用いている。励起用 LD は波長 974.0 nm で最大 750 mW のパタフライ型(1999CVB 3CN01762GL, 3SPhotonics)を利用し、電源は 1.5 A まで供給できるもの(CLD1015, Thorlabs Inc.)を利用している。

現在のところ、調整次第で、出力 150 – 300 mW で繰り返し 23.5 MHz で動作している。Figure 3 にパルス列の時間波形とそのフーリエ変換スペクトル、Fig. 4 に分光器で計測した 1030 nm 中心のスペクトルを示す。また、雰

囲気温度に対する発振器出力の変化を Fig. 5 に示す。

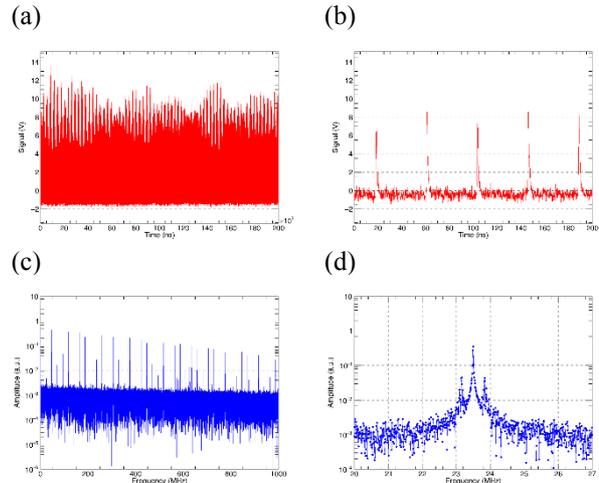


Figure 3: Oscillator output signal waveform digitized by an oscilloscope and its Fourier transformation. (a) the waveform, (b) its zoom-up on the time scale, (c) Fourier transformation of the waveform, and (c) zoom-up of the fundamental frequency region.

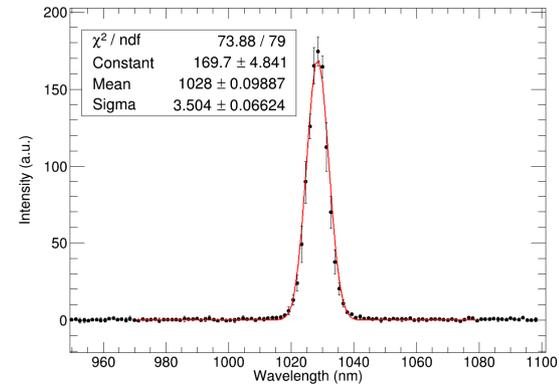


Figure 4: Optical spectrum of the oscillator output measured by a commercial spectrometer (CCS175/M, Thorlabs Inc.).

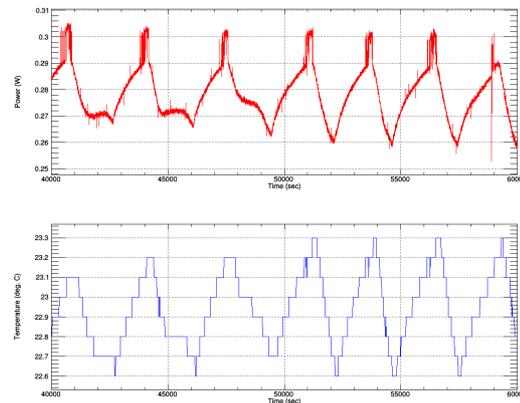


Figure 5: Trends of the output power of the oscillator and the environmental temperature.

2.3 増幅器

発振器出力はアイソレータを通して、ファイバー増幅器へ伝送する。現在ファイバー増幅器への入力調整を実施しているところである。現在のところの増幅器レイアウトを Fig. 6 に示す。増幅用 Yb ファイバー(Yb1200-20/400DC, Thorlabs Inc.)はダブルクラッドファイバーで、コア径 20 μm で N.A.が 0.07、クラディング径 400 μm の八角形で N.A.が 0.46 以上、波長 976 nm の光の吸収は 3.0 dB/m である。現在 10 m のものを利用し、両端はクリーブペンで傷をつけてから指ではじいて切断し、研磨紙で研磨している。励起光は増幅される光の出口側からダイクロミックミラーを透過させて入力する。励起用 LD は波長 976 nm の 50 W 出力(M1F2S22-976.3-50C-SS2.1, DILAS Diodenlaser GmbH)で、焦点距離 15 mm の非球面レンズによりコリメートし、同じ焦点距離のレンズでファイバーへ入力している。これまでのところ、10 W 超の励起光入力を試験しているが、アライメント不良時などでファイバー先端から 1 cm 程度のところでの焼損が 2 回確認された。また、励起光 10 W 程度のところで 1 W 程度の 1030 nm の自発出力光が見られた。

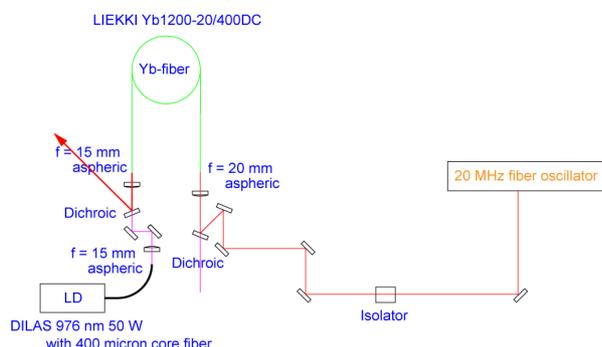


Figure 6: Schematic drawing of the setup of the amplifier development.

発振器からの光の入射には焦点距離 20 mm の非球面レンズで集光し、導入を試みている。レンズ位置付近での入射レーザー光のプロファイルを Fig. 7 に示す。N.A. 0.07 に対して、半径 0.9 mm の光を 200 mm の位置から集光して導入するので、ちょうど入射できる見積りである。現在のところ、まだコア伝送が確認できておらず、調整実施段階である。

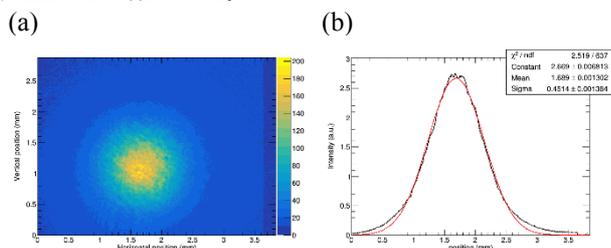


Figure 7: Laser profile of the oscillator output observed by a CMOS camera (DMK 21BUC03, The Imaging Source) near the lens for injection to the amplifier fiber. (a) image on the camera and (b) its horizontal projection.

3. まとめと今後の予定

FEL シードのための差周波発生による中赤外 CEP 安定化光源の開発を開始した。Yb ファイバーシステムによる設計で現在、発振器を構築し、増幅試験に取り掛かっている。今後、増幅システム完了後、ソリトンシフトによる波長シフト光生成試験と差周波発生試験へ進行する。

謝辞

本研究の一部は文部科学省平成 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返しアト秒光源のための基礎基盤技術の研究」の下で実施している。

参考文献

- [1] T. Popmintchev *et al.*, Science 336, 1287-1291 (2012).
- [2] Z. Chang, P.B. Corkum, and S.R. Leone, J. Opt. Soc. Am. B 33, 1081-1097 (2016).
- [3] R. Hajima and R. Nagai, Phys. Rev. Lett. 119, 204802-1-5 (2017).
- [4] R. Nagai *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A 483, 129-133 (2002).
- [5] C. Erny *et al.*, Opt. Lett. 32, 1138-1140 (2007).
- [6] T.W. Neely *et al.*, Opt. Lett. 36, 4020-4022 (2011).
- [7] G. Soboń *et al.*, Opt. Lett. 42, 1748-1751 (2017).
- [8] M. Beutler *et al.*, Opt. Exp. 23, 2730-2736 (2015).
- [9] <https://www.toptica.com/products/psfs-fiber-lasers/femtofiber-dichro/>
- [10] <https://www.ape-berlin.de/en/dfg-difference-frequency-generation/>
- [11] <https://www.menlosystems.com/products/optical-frequency-combs/mid-ir-comb/>
- [12] <http://eksmaoptics.com/nonlinear-and-laser-crystals/nonlinear-crystals/>
- [13] R.L. Byer *et al.*, Appl. Phys. Lett. 24, 65-68 (1974).
- [14] H. Lim, F.Ö. Ilday, and F.W. Wise, Opt. Lett. 28, 660-662 (2003).
- [15] K. Sumimura *et al.*, IEICE Elec. Exp. 3, 233-237 (2006).
- [16] X. Zhou *et al.*, Opt. Exp. 16, 7055-7059 (2008).
- [17] T. Kurita *et al.*, Opt. Exp. 19, 25199-25205 (2011).
- [18] R. Morita *et al.*, “クラブ衝突レーザーコンプトン散乱のための Yb 系レーザーシステム開発”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 1147-1151.