

差周波中赤外光源のためのファイバーレーザーの開発

DEVELOPMENT OF FIBER LASER SYSTEM FOR A MID INFRARED LIGHT SOURCE WITH THE DIFFERENCE FREQUENCY GENERATION

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

Abstract

As the project of the Basic Foundation Research on the MEXT – Quantum Leap Flagship Program (Q-LEAP), we are conducting the research on basic technologies for a high repetition attosecond pulse source driven by a free electron laser (FEL) collaborating with QST, Kyoto University, Nihon University and KEK. 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. Up to now, we have constructed a modelocked fiber laser oscillator with the frequency of 23.5 MHz, 3-W class preamplifier and 20-W class amplifier. We show the present status of developments of the laser system in this report.

1. はじめに

高次高調波アト秒 X 線発生は、これまで固体レーザーを基礎に研究開発が進められてきた。近年では、より短波長の X 線を発生させるためには、中赤外領域の数サイクルパルスにより高調波を駆動する必要があることが示唆されている[1]。また、多くの物質科学研究への利用においては、高繰り返し光源であることは広く望まれていることであり、そのための固体レーザー基礎とした中赤外光源の開発が進められているが、その繰り返し数は kHz のオーダーである[2]。さらに高繰り返し MHz オーダーでの高強度中赤外発生に対しては、媒質に熱的限界を伴わない外部共振器システムあるいは自由電子レーザー(FEL)が有効である。これまでのところ近赤外での外部共振器システムによる MHz オーダーの HHG 研究の報告があるが[3]、HHG の波長は 100 eV 程度であり、中赤外領域での外部共振器を用いた報告はまだない。本研究では羽島・永井の論文[4]で提案されている FEL 出力のキャリアエンベロープ位相(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、これまでいくつかの先行研究がある 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[5-7]。これは、数 W 程度に増幅した数百 fs のパルスを分離し、一部を高非線形性フォトニック結晶ファイバー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、元の 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ものである。

2. 装置開発の現状

昨年度報告[8]した発振器からの出力を 3 W 級前置増幅器、20 W 級増幅器の 2 段増幅で高出力化している。発振器出力はアイソレータを透過後、1/2 波長板で水平偏光に戻し、前置増幅器へ輸送している。開発中の Yb ファイバーレーザーシステムの概要を Fig. 1 に示す。

現在の発振器出力の典型的な特性を Fig. 2 に示す。発振器出力は調整具合により、Q スwitching 型モードロック動作になりがちである。出力安定性は実験室環境に依存するので、環境改善についても逐次、その影響を評価しながら進めている。2 次高調波発生による自己相関計測より、パルス長は 400 fs 程度と見積られるが、これも調整次第で多少変化する。また、FEL へのシード光源として利用するためには、発振器くり返し周波数の外部 RF 信号への位相ロックが必須であり、同期回路についても先行研究[9]を参考に並行して開発を進めている。

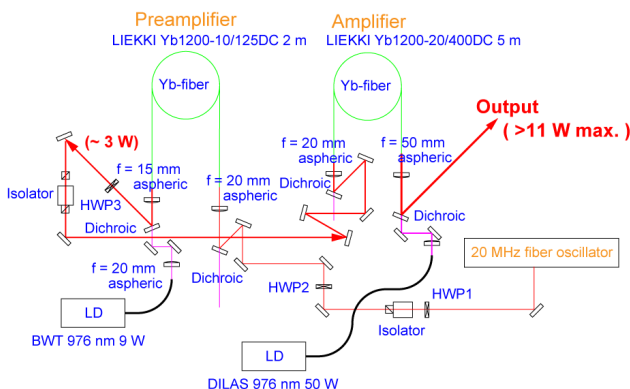


Figure 1: Schematic drawing of the fiber laser system.

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

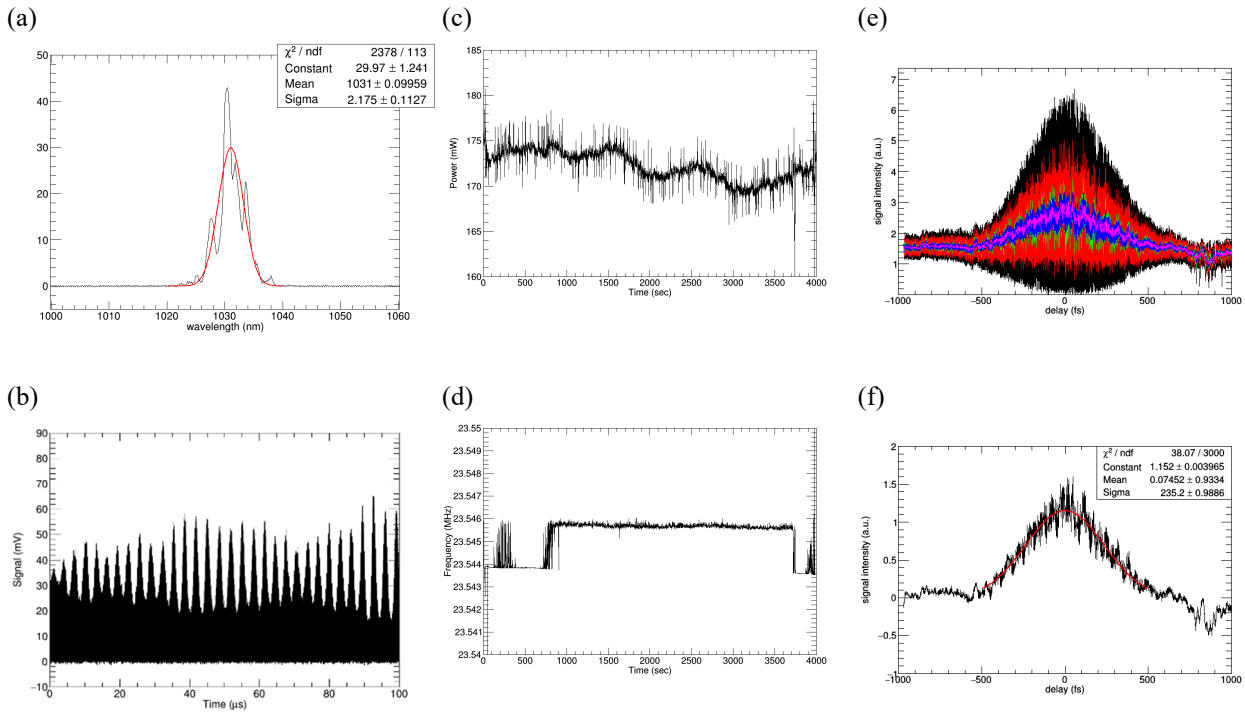


Figure 2: Typical characteristics of the constructed Yb-fiber laser oscillator. (a) spectrum, (b) the waveform of the laser output detected by a photodiode, (c) the trend of the output power measured by a power meter, (d) the trend of the pulse repetition frequency measured by a universal counter, (e) the interferometric autocorrelation trace with the second harmonic generation. The black line is the raw data with the 0.333 fs step scanning and the red, green, blue and purple lines show the smoothing data through the simple moving averaging with points of 5, 9, 17 and 33, respectively. (d) the bias rejected of the purple trace in (e).

2.1 前置増幅器

3 W 級前置増幅器は、2 m のダブルクラッド Yb 添加ファイバー (コア径 $10.0 \pm 1.0 \mu\text{m}$, コアの開口数 0.080 ± 0.005 , 第 1 クラッド径 $125 \pm 2 \mu\text{m}$, 第 1 クラッド開口数 ≥ 0.48 , 976 nm の吸収 7.4 dB/m, LIEKKI Yb1200-10/125DC (数値はすべてカタログ値)) を用い、端部処理は納入時に FC コネクタ、斜め研磨を指定した。発振器からの信号光は、いくつかの銀ミラーで輸送された後、ダイクロイックミラー (Layertec 105905 Short Wave Pass Filter) で反射させ焦点距離 20 mm の非球面レンズ (Thorlabs AL2520M-B) で Yb ファイバーへ入射している。励起レーザーとして、最大 9 W の 976 nm レーザーダイオード (LD, BWT K976AB2RN-9.000W) を用いている。LD 本体はペルチェ冷却ユニット (ミスミ PELT30) に銅ブロックを介して設置され、ペルチェ温度コントローラ (ミスミ PLCN) により温度調整されている。温度はペルチェ冷却ユニットに取り付けた K 熱電対 (ミスミ MSNDFL2.3-30-F1-M) で計測している。LD 用電源には、菊水電子製 PAN16-10A を用いている。LD からの出力は焦点距離 20 mm の非球面レンズでコリメータし、ダイクロイックミラーを透過させた後、焦点距離 15 mm の非球面レンズで Yb ファイバーへ信号出力側から入射している。入出力のアライメントは Yb ファイバー端部を固定する 3 軸ステージ (シグマ光機 TSD-405C) と輸送系ミラーで調整した。信号光の入射は、励起光を入力することにより発生

する自発放射増幅光を逆行するように調整した [10]。増幅光はダイクロイックミラーで反射して取り出され、アイソレータを通して 20 W 級増幅器へ送られる。

これまでのところ、前置増幅器の出力は最大 2.5 W で、この時の信号光パワーはアイソレータの前で 0.28 W であった。最大出力は LD を駆動する電源の最大電流 10 A で制限されている。励起光パワーに対する増幅器出力パワーの効率 (スロープ効率) は 0.34 であり、期待したよりも低い (Fig. 3)。励起光入力との結合を 1 と仮定した評価であり、詳細については今後調査する。

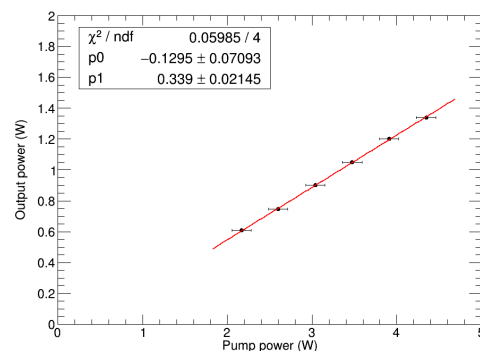


Figure 3: Preamplifier output dependence on the power of the pump LD.

また、Yb ファイバーの先端を斜め研磨ではなく、ダイヤモンドスクライブによる手動切断したファイバーを用いた増幅試験も実施したが、入射アライメントによる出力の最大化調整および励起光増大による増幅光強度の増大を進めることで、発振器のモードロック動作が高頻度で停止した。信号光入力を途中で遮るとモードロック動作が回復することから、ファイバー先端からの反射による戻り光の影響であると考えられるが、増幅光強度に依存してモードロック動作停止頻度が増加する傾向があったので、この問題に関する定量的な評価は今後の課題である。このために現在、斜め研磨ファイバーを利用している。

2.2 増幅器

20 W 級増幅器は 5 m のダブルクラッド Yb 添加ファイバー(コア径 $20 \pm 2 \mu\text{m}$, コアの開口数 0.07 ± 0.01 , 第 1 クラッド径 $400 \pm 15 \mu\text{m}$, 第 1 クラッド開口数 ≥ 0.46 , 976 nm の吸収 3.0 dB/m , LIEKKI Yb1200-20/400DC (数値はすべてカタログ値))を用い、端部はダイヤモンドスクライブを用いて手動で切断した。前置増幅器からの入力光は、ダイクロイックミラーで反射させ焦点距離 20 mm の非球面レンズで Yb ファイバーへ入射している。励起レーザーとして、最大 50 W の 976 nm LD(Dilas M1F2S22-976.3-50C-SS2.1)を用いている。LD 本体は水冷銅ブロック上に設置され、チラー(NESLAB RTE-110)により温度調整されている。LD 用電源には、松定プレジジョン製 PK6-65 を用いている。LD からの出力は焦点距離 20 mm の非球面レンズでコリメータし、ダイクロイックミラーを透過させた後、焦点距離 50 mm の非球面レンズで Yb ファイバーへ信号出力側から入射している。入出力のアライメントは前置増幅器同様、Yb ファイバー端部を固定する 3 軸ステージと輸送系ミラーで調整した。増幅光はダイクロイックミラーで反射して取り出される。

これまでのところ、増幅器の最大出力は 11.5 W で、この時の LD 出力パワーは 40 W であった。しかしながら最大出力調整時に Yb ファイバーの先端が焼損し、増幅器調整試験を途中で中断した。この時のスロープ効率率は 0.42 で、同様に期待よりも低い(Fig. 4)。励起光パワーを増加させていくと Yb ファイバー先端が熱負荷によりたわんでしまい、結果焼損に至ったと考えられる[11]。今後、先端保持配置を再考し、冷却についても検討する。

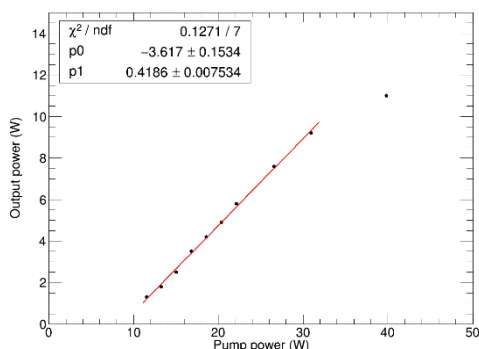


Figure 4: Amplifier output dependence on the power of the pump LD.

2.3 波長シフト試験

ラマンシフトソリトン発生試験には、 2 m の高非線形性フォトニック結晶ファイバー(PCF, FORC HN-PCF-800, Fig. 5)を利用し、前段増幅器出力を導入している。PCF への入力光強度調整には $1/2$ 波長板と偏光ビームスプリッターキューブ(PBS)を利用している。当初は焦点距離 20 mm で直径 25 mm の非球面レンズを利用して PCF へ光を入射していたが、透過光強度が低くラマンシフトも見られなかった。そのため、入力レンズを焦点距離の短い非球面レンズ($f = 7.5 \text{ mm}$, 開口径 4.5 mm (シグマ光機 A375B), $f = 6.24 \text{ mm}$, 開口径 5.00 mm (Thorlabs A110TM-B), $f = 4.51 \text{ mm}$, 開口径 5.07 mm (シグマ光機 A355B))を用いた試験が現在進行中である。

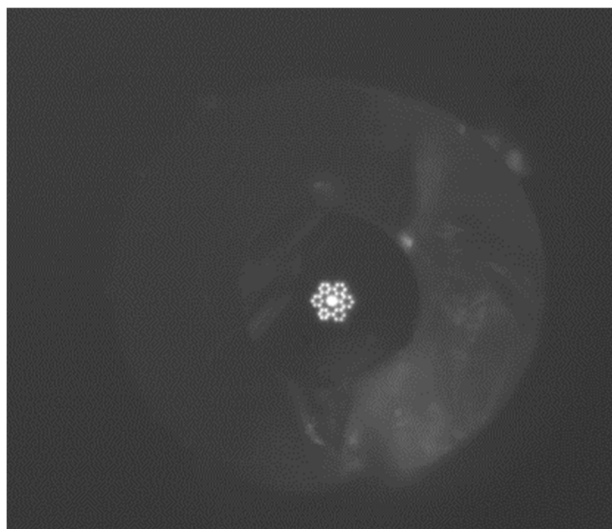


Figure 5: Photograph of the PCF illuminated from the opposite side of the fiber with a white LED.

2.4 差周波発生 の 検 討

差周波発生はラマンシフトさせた PCF 出力光をシグナル、PBS で分離した Yb ファイバー増幅器の出力をポンプとして非線形結晶へ共軸入射し、差周波発生のアイドラーを中赤外光として利用する。現在想定している非線形結晶は、波長領域 $3 - 4 \mu\text{m}$ に対して周期的分極反転配置した酸化マグネシウム添加ニオブ酸リチウム(MgO:PPLN)あるいはタンタル酸リチウム(PPMgSLT)、 $5 - 18 \mu\text{m}$ に対してはセレン化ガリウム銀(AgGaSe₂)である。

3. ま と め

CEP 安定中赤外 FEL のためのシード光源として差周波発生による数十 mW 級の CEP 安定化中赤外光源を開発中である。基礎となるレーザーは Yb ファイバーレーザーシステムで、発振器は 23.5 MHz , 200 mW , 400 fs , 1030 nm の受動モードロック Yb ファイバーレーザー発振器を製作し利用している。発振器に関しては、環境改善による出力安定化が直近の課題であり、逐次進めている。発振器出力は 2 段の増幅器で増幅し、そ

れぞれ 2.5 W, 11.5 W の出力を得ている。しかしながら後段の増幅器のファイバー先端焼損のため、現在、先端保持について検討している。現在のところ、前段増幅器からの出力を用いて PCF による波長シフト試験を継続している。波長シフト確認後、差周波発生についての詳細設計を実施し、中赤外光源の構築を進める。FEL へのシード光源とするためにはレーザー発振器の外部 RF 発振器への位相ロックも必須であり、並行して開発を進めている。

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] N. Ishii *et al.*, *Opt. Exp.* 27, 11447 (2019).
- [3] H. Carstens *et al.*, *Optica* 3, 366 (2016).
- [4] R. Hajima and R. Nagai, *Phys. Rev. Lett.* 119, 204802 (2017).
- [5] T.W. Neely *et al.*, *Opt. Lett.* 36, 4020 (2011).
- [6] G. Soboń *et al.*, *Opt. Lett.* 42, 1748 (2017).
- [7] L. Jin *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* vol. 24, no. 3, 0900907 (2018).
- [8] 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.
- [9] M. Mori *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* 87, 063307 (2016).
- [10] Y. Honda, private communication.
- [11] L. Jin, private communication.