

広帯域波長可変ファイバ光パラメトリック発振器の高出力化

High-power and broadband-tunable fiber optical parametric oscillator

東大院工 ○高橋 俊, 小関 泰之

The Univ. of Tokyo, °Shun Takahashi and Yasuyuki Ozeki

E-mail: shun.takahashi@ginjo.t.u-tokyo.ac.jp

誘導ラマン散乱(SRS)顕微法は、生体試料を生きたまま低侵襲に可視化する手法として医学・生物学分野での利用が広がっている[1]。試料中分子の複数の共振モードを連続的に励起し、超多色 SRS イメージング[2]を行うためには、2 色の同期ピコ秒パルス光源の一方で広帯域かつ高速な波長チューニングが求められる。しかし、一般的な波長可変光源である光パラメトリック発振器や Yb/Er 添加ファイバレーザは、可変範囲または可変速度のいずれかで要求に及ばない。そこで可変範囲・速度を両立する新たな波長可変光源としてファイバ光パラメトリック発振器(FOPO) [3,4]が注目されている。我々はこれまでに広帯域波長可変性 (1200 cm^{-1})を有し、かつ低雑音レーザとの組み合わせで高速イメージングに対応可能な FOPO を報告した[5]が、その出力パワーは 30 mW に留っており、SRS 顕微法へ応用するには FOPO の高出力化が不可欠であった。本研究では、ポンプ光として用いる Yb 添加ファイバレーザ(YDFL)の高出力化と自己位相変調(SPM)に伴うスペクトル拡張の抑制により、ポンプ光のパワースペクトル密度を向上させ、FOPO の出力パワーを 57 mW まで高めることに成功した。

Fig. 1(a)に FOPO の概要を示す。モード同期ファイバレーザから生成された 39 MHz の光パルスは波長フィルタにより約 0.2 nm (バンド幅: $1020\text{--}1050\text{ nm}$)に狭窄化する。その後、前段の Yb 添加ファイバ増幅器(YDFA)と後段の大モード面積(LMA)ダブルクラッド YDFA によりパワーを増幅する。コア径 $20\text{ }\mu\text{m}$ の LMA ファイバにより非線形光学効果を抑制するとともに、高次モードの曲げ損失が基本モードのそれよりも大きいことを利用してシングルモード動作を得る。出力パワー 0.9 W と 2.1 W でのスペクトル幅はそれぞれ 0.48 nm と 0.73 nm であり(Fig. 1(a)), SPM が抑制できていることが分かる。光パルス時間幅は約 7 ps である。YDFL の出力光をポンプ光としてフォトニック結晶ファイバ(PCF)に入射し、四光波混合を介して生成したシグナル光を一部共振器内にフィードバックすることで FOPO を発振させる。また YDFL と FOPO 内の波長フィルタを操作することで波長チューニングを行う。

Fig. 1(b),(c)に FOPO の波長をチューニングした際の出力パワーとスペクトルを示す。FOPO 出力パワーは最大 57 mW を超え、可変範囲は 1230 cm^{-1} ($798\text{--}886\text{ nm}$)である。PCF への結合パワーを向上させることで FOPO の更なる高出力化が見込める。

謝辞 本研究は、JST CREST (JPMJCR1872), MEXT Q-LEAP (JPMXS0118067246), JSPS KAKENHI (JP19J22546, JP20H02650, JP20H05725)の助成を受けて実施された。

参考文献 [1] J.-X. Cheng *et al.*, *Stimulated Raman Scattering Microscopy: Techniques and Applications* (Elsevier,2021). [2] Y. Ozeki *et al.*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **25**, 7100211 (2019). [3] M. Brinkmann *et al.*, Biomed. Opt. Express **10**, 4437 (2019). [4] T. Würthwein *et al.*, Biomed. Opt. Express **12**, 6228 (2021). [5] S. Takahashi *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett. **34**, 1293 (2022).

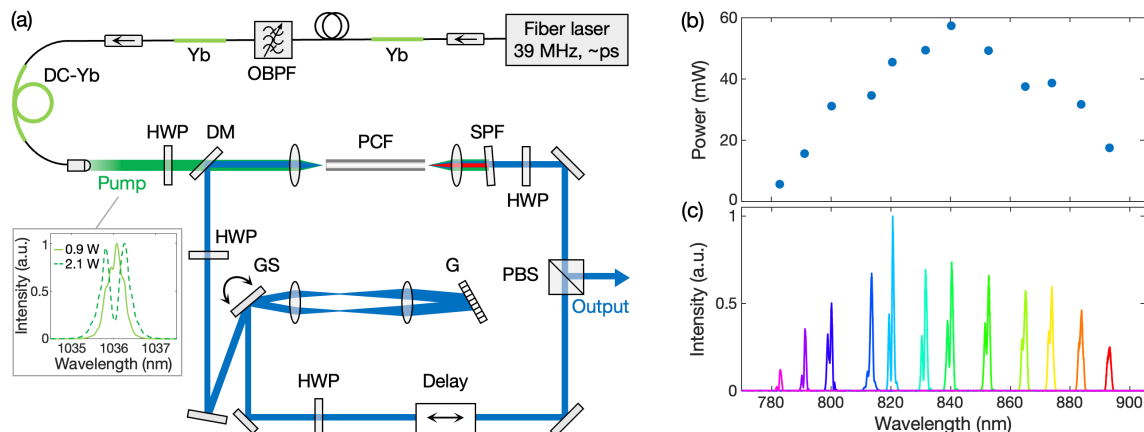


Fig. 1. (a) Schematic of FOPO. The inset shows spectra of pump pulses at 0.9 W and 2.1 W average power. OBPF: optical band-pass filter, DC: double-clad, HWP: half-wave plate, DM: dichroic mirror, PCF: photonic crystal fiber, SPF: short-pass filter, PBS: polarizing beam splitter, GS: galvanometric scanner, G: grating. (b) Output power and (c) spectrum when tuning the wavelength of FOPO.