

誘導ラマン散乱顕微鏡のための低雑音な 9 の字型 Er ファイバレーザ

Figure-nine Er Fiber Laser Oscillator with Low Intensity Noise

for Stimulated Raman Scattering Microscopy

東大工¹, 株式会社光響², 東大院工³ ○吉見 拓展¹, 住村 和彦², 小関 泰之³

Univ. of Tokyo^{1,3}, Kokyo Inc.², °Hironobu Yoshimi¹, Kazuhiko Sumimura², Yasuyuki Ozeki³

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

高速・無標識生体イメージング法として注目を集める誘導ラマン散乱 (SRS) 顕微鏡において、実用性の高いパルス光源としてファイバレーザ (FL) の適用が報告されている[1-4]. しかしながら, SRS 顕微鏡のポンプ光源には, 出力パワーが数十 mW 以上で, 強度雑音がショット雑音限界であることが望ましい[5]という制約がある. これに対し, FL の典型的な光出力は数 mW 程度しかなく, 強度雑音の評価も mW 以下の光パワーでしか報告されていない[6, 7]. このため, 従来の FL 型 SRS 顕微鏡では, バランスド検出を用いて強度雑音の影響を低減しているのが現状である. 強度雑音がショット雑音限界で, 高出力な FL を実現できれば, 実用性の高い光源として利用できる可能性がある.

今回, 長期安定性に優れる 9 の字 (F9) 型構成の偏波保持 Er-FL [8-11]をピコ秒発振させることで, mW レベルの光出力において, ショット雑音限界に迫る強度雑音を確認したので報告する.

Fig. 1 に, 試作した F9-FL の構成を示す. レーザは NOLM とチャープ FBG (CFBG) からなり, NOLM 内には Er 添加ファイバと NPS を含む. NOLM から出てきた光は CFBG に入り, その 5% が透過してレーザの出力となる. 残りの 95% は 20.8 ps/nm の異常分散を与えられて反射され, 再び NOLM に向かう. CFBG で大きな分散を与えることでパルスのエネルギーを大きくし, 共振器

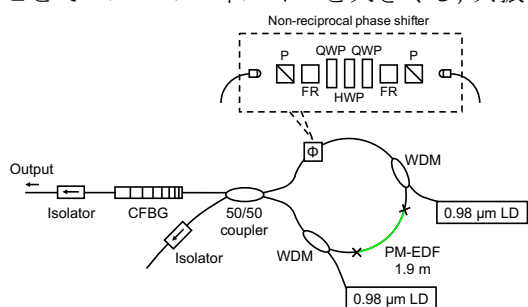


Fig. 1. The schematic of F9-FL. CFBG: chirped fiber Bragg grating. P: polarizer. FR: 45-deg. Faraday rotator. QWP: quarter wave plate. HWP: half wave plate. WDM: wavelength division multiplexer. LD: laser diode. EDF: Er-doped fiber.

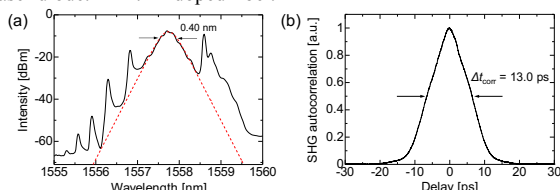


Fig. 2. The characteristics of the laser pulses. (a) Spectrum (solid line) and sech^2 fit (dashed red line). (b) Autocorrelation trace.

のフィネスを高めることで ASE 雑音の影響を抑制した[6].

試作したレーザは, 励起光パワー650 mW でセルフスタートし, 繰り返し周波数は 40 MHz, 出力光パワーは 7.6 mW であった. Fig. 2(a)にパルスの光スペクトル, (b)に自己相関波形を示す. パルス波形を sech^2 と仮定するとパルス幅は 8.4 ps, スペクトル幅は 0.40 nm である. 時間帯域幅積は 0.41 と計算され, フーリエ変換限界に近いパルスが出力されることが分かった.

出力パルスの強度雑音を計測するために, 光出力をフォトダイオード (PD) で受光し, カットオフ周波数 3 MHz のローパスフィルタを介して, RF スペクトラムアナライザで信号を計測した. PD で受光する光パワーを変えながら, 2 MHz の雑音成分をプロットした結果を Fig. 3 に示す. 光パワー4.8 mW において, ショット雑音限界に 2.4 dB まで迫る低雑音性を確認した. 詳細は講演で報告する.

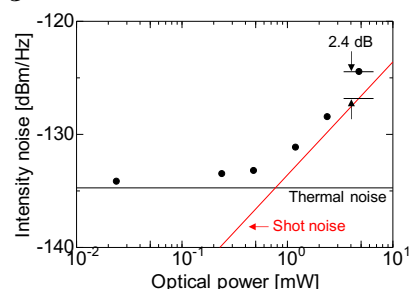


Fig. 3. Intensity noise of the laser output at 2 MHz as a function of optical power (dot). Red line: theoretical shot noise level. Black line: theoretical thermal noise level.

参考文献

- [1] A. Gambetta *et al.*, Opt. Lett. **35**, 226 (2010).
- [2] K. Nose *et al.*, Opt. Express **20**, 13958 (2012).
- [3] C. W. Freudiger *et al.*, Nat. Photon. **8**, 153 (2014).
- [4] C. Riek *et al.*, Opt. Lett. **41**, 3731 (2016).
- [5] Y. Ozeki *et al.*, Opt. Express **17**, 3651 (2009).
- [6] I. L. Budunoglu *et al.*, Opt. Lett. **34**, 2516 (2009).
- [7] J. Chen *et al.*, Opt. Lett. **32**, 1566 (2007).
- [8] N. Kuse *et al.*, Opt. Express **24**, 3095 (2016).
- [9] W. Hänsel *et al.*, Appl. Phys. B **123**, 41 (2017).
- [10] Y. Ozeki and T. Fukazu, CLEO 2016, JTu5A.119 (2016).
- [11] T. Fujita and Y. Ozeki, CLEO 2017, SM4L.6 (2017).