

17p-F7-11

Multi-GHz 光周波数コムによる超高分解能小型分光器の波長校正

Compact and ultra-high-resolution spectrograph with multi-GHz optical frequency comb

東大物性研¹, JST ERATO², キヤノン³, 〇遠藤 護^{1,2}, 助川 隆³, Alissa Silva^{1,2}, 小林 洋平^{1,2}ISSP, Univ. Tokyo¹, JST ERATO², Canon Inc.³, 〇Mamoru Endo^{1,2}, Takashi Sukegawa³, Alissa Silva^{1,2}, Yohei Kobayashi^{1,2}

E-mail: endo@issp.u-tokyo.ac.jp

【はじめに】近年になって光周波数コム（以下、コム）の縦モードを使用した天文用分光器の波長校正の技術が確立しつつあり、恒星のドップラーシフトを数 cm/s の精度で測定することも可能となっている[1]。しかし下記に挙げるようにいくつかの点で課題が残る。縦モードが十分に分解できるような高い繰り返し周波数 (>10 GHz) を持つコムは一般的でないため、数百 MHz のコムに複数段のフィルタリングキャビティーを使用して縦モードを間引く必要がある。このフィルタリングキャビティーの制御が困難であるため、その利用には熟練した技術を要する上に長期安定性に欠ける。さらに間引く作業によりパワーが百分の一程度に減るという問題もある。また、十分な信号対雑音比(SNR)を持ち高分解能で望遠鏡への組み込みが容易な分光器がない、という課題もある。今回は 4-GHz 以上という高い繰り返し周波数をもつモード同期レーザーを元にしたコムを作成し、その縦モードを十分に分解できるほど高い分解能（～ 800 MHz）を持つテーブルトップサイズの分光器を開発した。これらを組み合わせることにより、これまで一部の天文台でしか実現できなかった光周波数コムによる分光器の波長校正が身近になり、小中規模の天文台でもこの技術が使用できると考える。

【実験】元となるモード同期レーザーは繰り返し周波数が 4 GHz のカーレンズモード同期 Yb:Y₂O₃ セラミックレーザーである[2]。スペクトルは 1076 nm 中心に 7 nm (FWHM)であり、オートコリレーションの結果 176 fs の超短パルスを生成している。励起光源として小型レーザーダイオードを使用しており、平均光出力は約 30 mW である。光周波数の安定化のために、繰り返し周波数が 1/16 である 246 MHz の Yb ファイバ光周波数コムとのビート信号を用い、音響光学変調素子(AOM)にフィードバックすることで、ビートの線幅を 500 kHz で安定化させることに成功した。なお、AOM での損失を補うために、AOM 後に Yb ファイバアンプを挿入している。天文用の用途では 10 k～1 MHz の精度で周波数が安定化されていれば十分であるため、実際の使用が可能である。高分解能分光器には大型透過型回折格子 (180 × 40 mm, 1740 g/mm, 回折効率 90% @1080 nm) を用い、高分散を実現するためにマルチパス方式を採用した (Fig. 1 (b))。シングルモードファイバからの出射光をレンズでコリメートした後、上記の回折格子で 5 回回折させることで、スループット 30%、周波数分解能 800 MHz ($R = f/\Delta f = 350000$) を達成した。Figure 2 は上記 4 GHz のモード同期レーザーのスペクトルの一部 (幅 1 nm, 中心波長 1076 nm) を分光した結果である。各輝点はモード同期レーザーの縦モードを表しており、4 GHz のレーザーの縦モードが十分分解できていることが分かる。

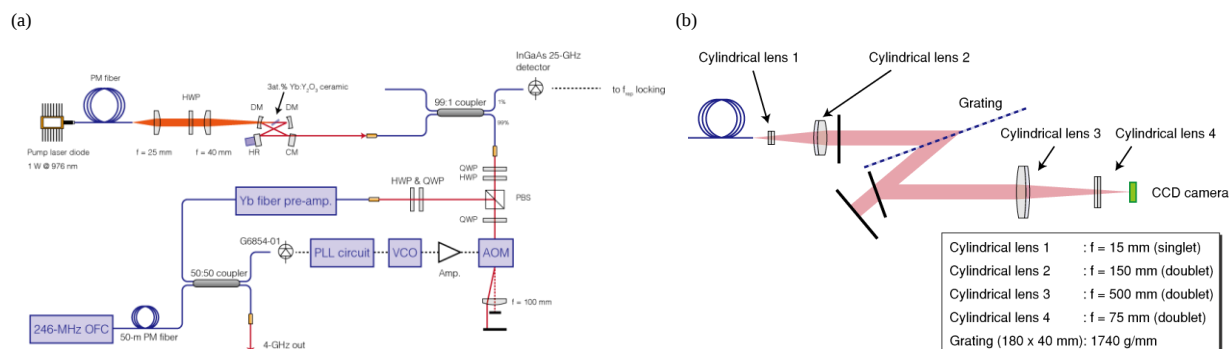


Figure 1. Experimental apparatuses of (a) 4-GHz optical frequency comb and (b) multi-pass spectrograph. PM; polarization maintaining, HWP (QWP); half (quarter) -wave plate, DM; dichroic mirror, HR; high-reflection mirror, CM; chirped mirror, PBS; polarization beam splitter, OFC; optical frequency comb, PLL; phase locked loop, VCO; voltage controlled oscillator, Amp.; RF amplifier.

Figure 2. Image of the longitudinal modes of 4-GHz laser on a CCD

[1] T. Wilken, *et al*, "A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level," *Nature* **485**, 611–4 (2012).

[2] M. Endo, A. Ozawa, Y. Kobayashi, "6.8-GHz, Kerr-lens mode-locked Yb:Y₂O₃ ceramic laser," 第 74 回応用物理学会学術講演会, 19a-A3-8 (2013)