

# デュアルコム分光法の高分解能 Rb 原子分光への応用

(1. 電通大, 2. JST, ERATO 知的光シンセサイザ, 3. JSPS)

西山 明子<sup>1,2,3</sup>・浅原 彰文<sup>1,2</sup>・吉田 悟<sup>1,2</sup>・中嶋 善晶<sup>1,2</sup>・美濃島 薫<sup>1,2</sup>

## Application of the Dual Comb Spectroscopy to High-Resolution Spectroscopy of Rubidium atom

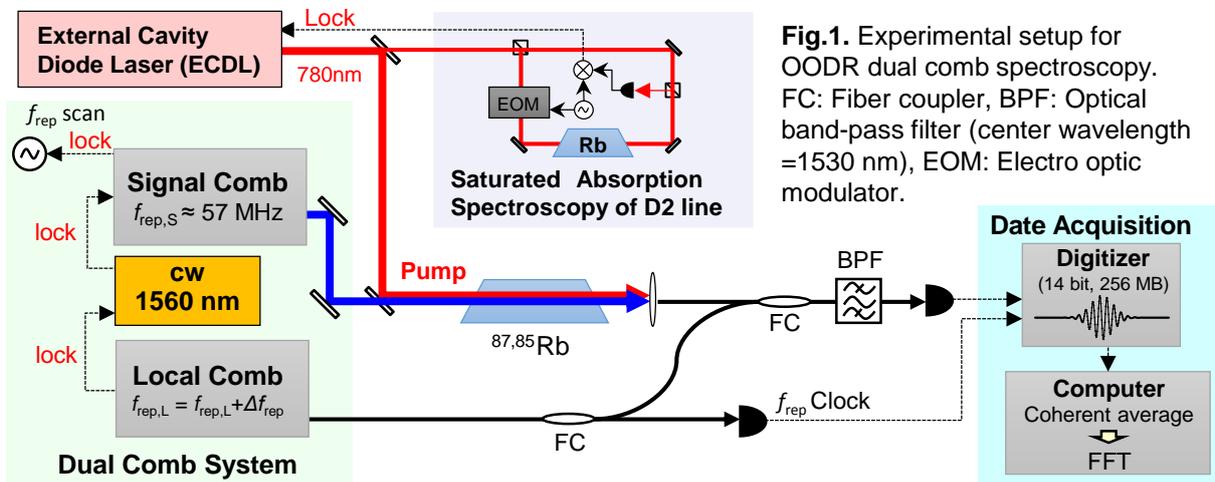
(1. UEC, 2. JST, ERATO Intelligent Optical Synthesizer (IOS), 3. JSPS )

A. Nishiyama<sup>1,2,3</sup>, A. Asahara<sup>1,2</sup>, S. Yoshida<sup>1,2</sup>, Y. Nakajima<sup>1,2</sup>, and K. Minoshima<sup>1,2</sup>

Dual comb spectroscopy is a Fourier-transform spectroscopy with two optical frequency combs which have slightly different repetition frequencies. The dual comb system has the ability of high resolution measurement only limited by narrow linewidth of comb modes. In this study, we applied the dual comb spectroscopic method to optical-optical double resonance (OODR) spectroscopy which is a velocity selective spectroscopy. An external cavity diode laser was used as a pump laser for OODR spectroscopy and transitions from the intermediate states were observed with a dual comb spectroscopic measurement. We observed fully resolved hyperfine structure of  $4D_{3/2}$ ,  $4D_{3/2} \leftarrow 5S_{1/2}$  transition of Rb.

【序】デュアルコム分光法とは、わずかに繰り返し周波数が異なる 2 台の光周波数コムを用いた分光法であり、高分解能・高精度・広帯域のスペクトルを短時間で得ることが可能である。特に分解能については、フーリエ変換赤外分光法のような光路長の機械的掃引を用いず、光周波数コムの繰り返し周波数 ( $f_{\text{rep}}$ , 数十から数百 MHz) の分解能が得られる。さらに、光周波数コムにおける各モードの狭線幅な周波数特性から、モード周波数の高精度掃引を加えることにより、 $f_{\text{rep}}$  以下の微細な構造を観測することも可能である [1]。ただし、光周波数コムを直接光源に用いた分光法は、コムのモード 1 本あたりのパワーが小さいために非線形分光への適用が難しく、これまでにデュアルコム分光法によって得られた気体分子スペクトルの実際の分解能は、ドップラー幅に制限されたものであった。

そこで本研究では、デュアルコム分光法を、コムの周波数高精度性を生かした高分解能分子分光へ応用することを目指し、デュアルコムシステムを光-光二重共鳴 (OODR) 分光法に適用した。OODR 分光法では、ドップラー幅よりも十分に狭線幅な励起光によって原子を速度選択的に中間準位に励起することで、ドップラー幅の制限を受けない高分解能スペクトルが得られる。開発した OODR デュアルコム分光システムを用いて、Rb 原子の  $4D_{3/2}$ ,  $4D_{3/2} \leftarrow 5S_{1/2}$  遷移 [2] を測定



し、超微細構造を分離して観測する高分解能デュアルコム分光計測を行った。

【実験】 Figure 1 に、本実験に用いた OODR デュアルコム分光システムの概略を示した。励起光源として、外部共振器型半導体レーザー (ECDL, 線幅  $< 1$  MHz) を用い、 $^{87}\text{Rb}$  の  $5\text{P}_{3/2} \leftarrow 5\text{S}_{1/2}$  遷移を励起した (Fig. 2)。ECDL は、飽和吸収分光によって観測した Rb 原子の超微細構造遷移に FM 分光法を用いて安定化している。

デュアルコム分光システムでは、中間準位に励起された Rb 原子の  $4\text{D}_{3/2}$ ,  $4\text{D}_{5/2}$  への遷移 (Fig. 2) を同時に観測した。本システムでは、2 台のモード同期 Er 添加ファイバーレーザーを光周波数コムとして用いた。1 台のコム (シグナルコム) は  $f_{\text{rep}}$  (約 57 MHz) とオフセット周波数を RF 周波数基準に安定化し、もう 1 台のコム (ローカルコム) は cw レーザーを介して相対的に安定化した。この安定化によって 2 台のコムの相対的な揺らぎを表す相対線幅は、1 Hz 以下まで抑えられている。シグナルコムの出力光は、励起光と重ねて Rb セルに入射し、ローカルコムとの干渉を取った後、光バンドパスフィルタを通してディテクタに入射した。本実験では、2 台のコムの繰り返し周波数の差  $\Delta f_{\text{rep}}$  を 500 Hz としたので、1 つのインターフェログラム取得にかかる時間は  $1/500$  s である。デジタルで取得したインターフェログラムは、時間波形のまま積算し、測定終了後にフーリエ変換を行ってスペクトルを得た。1 つのインターフェログラムから得られるスペクトルのサンプリング周波数間隔は  $f_{\text{rep}}$  であるが、シグナルコムのモード周波数を掃引して測定を繰り返し、 $f_{\text{rep}}$  以下の分解能でスペクトルを得た。

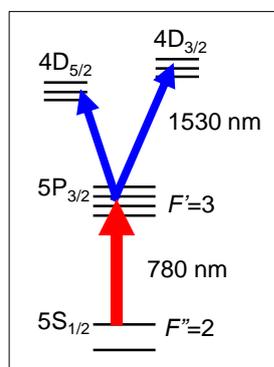
【結果】 Figure 3 に、本研究で得られた Rb 原子の OODR スペクトルを示した。インターフェログラムの積算は 25000 回、モード周波数の掃引ステップは約 3.5 MHz である。約 196 THz (約 1530 nm) に、中間準位から  $4\text{D}_{3/2}$ ,  $4\text{D}_{5/2}$  への遷移が観測された (Fig. 3 (a))。この光スペクトルの幅は、光バンドパスフィルタの透過帯域幅によって決まっている。Figure 3 (b),(c) は、(a) のスペクトルを拡大したものである。超微細構造が分裂して観測されており、ドップラー幅に制限されない高分解能スペクトルが得られた。最も大きい超微細構造遷移のスペクトル幅は、それぞれ 59 MHz と 46 MHz であった。本研究に用いた光周波数コムの  $f_{\text{rep}}$  は約 57 MHz であるから、この測定では  $f_{\text{rep}}$  以下の分解能での測定を実現している。また、得られたスペクトルの絶対周波数は、RF 基準に安定化した光周波数コムの精度で決定することが可能である。

講演では、OODR デュアルコム分光システムと得られたスペクトルの詳細を述べる。

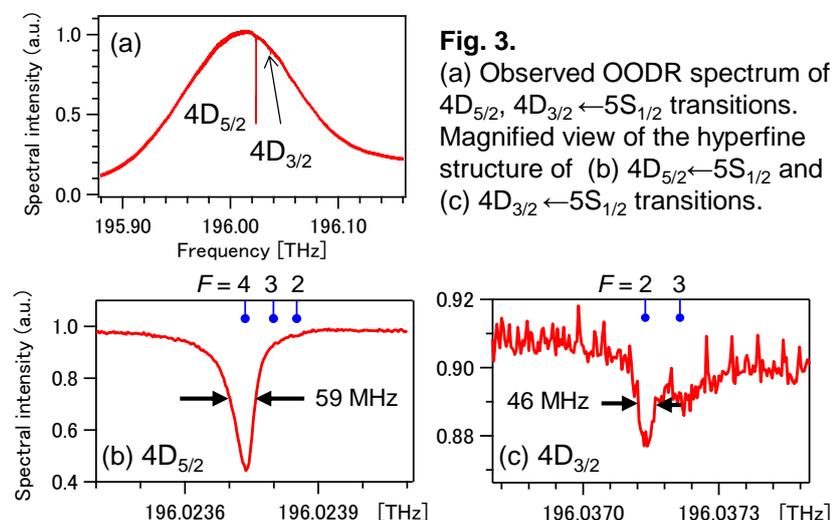
本研究は、JST、ERATO 美濃島知的光シンセサイザプロジェクトの助成を受けて行われた。

[1] S. Okubo, Y.-D. Hsieh, H. Inaba, A. Onae, M. Hashimoto, and T. Yasui, *Opt. Express* 23, 33184 (2015).

[2] H. Sasada, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 4, 1307 (1992).



**Fig. 2.** Energy level diagram for rubidium.



**Fig. 3.** (a) Observed OODR spectrum of  $4\text{D}_{5/2}$ ,  $4\text{D}_{3/2} \leftarrow 5\text{S}_{1/2}$  transitions. Magnified view of the hyperfine structure of (b)  $4\text{D}_{5/2} \leftarrow 5\text{S}_{1/2}$  and (c)  $4\text{D}_{3/2} \leftarrow 5\text{S}_{1/2}$  transitions.