

正確な周波数の光を作る

光周波数シンセサイザによる超高分解能分光

マイクロ波周波数と光周波数をつなぐ広帯域光周波数コムと、光出力のための広帯域周波数可変光源である連続波光パラメトリック発振器 (cw-OPO) を組み合わせることによって、広帯域にわたる連続発振光の出力が可能な「光周波数シンセサイザ」を開発した。ここでは、この光周波数シンセサイザの原理とそれを用いた超高分解能分光について述べる。

A continuous-wave optical frequency synthesizer was developed using a monolithic type continuous-wave optical parametric oscillator (cw-OPO) and an optical frequency comb. The cw-OPO was phase-locked to an optical frequency comb that was phase-locked to an atomic clock. The output frequency of the cw-OPO was frequency-shifted with an electro-optic modulator (EOM), which made it possible to tune the frequency continuously over 10 GHz. Furthermore, Doppler-free spectroscopy was performed using the optical frequency synthesizer for a cesium D1 line at 895 nm.

光周波数シンセサイザ

光周波数シンセサイザとは、周波数標準に基づいた正確なマイクロ波周波数から任意の光周波数を合成する装置で、長い間望まれてきた夢の装置であった。20世紀末に、フェムト秒モード同期レーザとフォトニック結晶ファイバを利用した光周波数計測技術が出現し、1オクターブ以上にわたる広い波長域で、周波数の絶対値が確定した、くし状のスペクトル(光コム)を発生することが可能となった。光コムはそれ自身「光周波数シンセサイザ」と呼べるものである。しかし、発生したコムの1本1本のパワーはnW (10

億分の1ワット)程度しかなく、その1本を抜き出すことも難しいため、周波数計測以外の計測用途に応用することは困難である。もし、コムのスペクトル域にわたって波長可変な連続発振光源があれば、それを光コムに位同期することにより、「連続発振光周波数シンセサイザ」を実現できる。このようなシステムができれば、学術的には多種の原子の分光、操作や基礎物理定数の決定、応用としては長さ標準や光パワー標準などへの応用、大気中の微量分子の分析や環境計測などさまざまな精密計測への利用が可能となる。

稲場 肇 Hajime Inaba
h.inaba@aist.go.jp
計測標準研究部門
時間周波数科 波長標準研究室

1993年に旧工業技術院計量研究所に入所して以来、連続発振光ファイバレーザの安定化およびモード同期レーザが発生する光コムを用いた光・マイクロ波リンク技術の研究などに従事してきた。夢は、「光周波数シンセサイザ」を武器として、欲しい光周波数をいつでもどこでも供給するシステムの構築であり、同時に基礎物理定数の決定・物理法則の検証などに寄与していくことである。

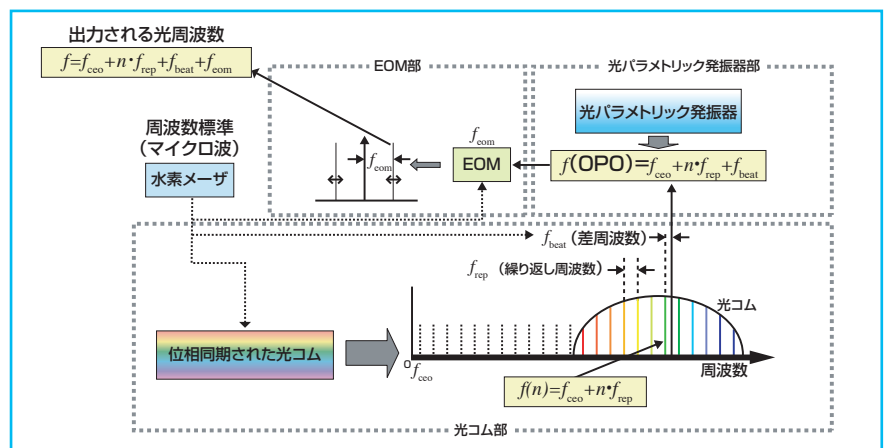
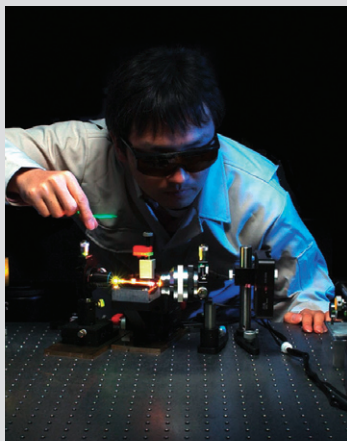


図1 光周波数シンセサイザの構成

モード同期レーザが発生する光コム部、連続発振光の出力段となる光パラメトリック発振器 (OPO) 部および連続周波数可変を実現する電気光学変調器 (EOM) 部から構成される。正確なマイクロ波から、光周波数を合成する。

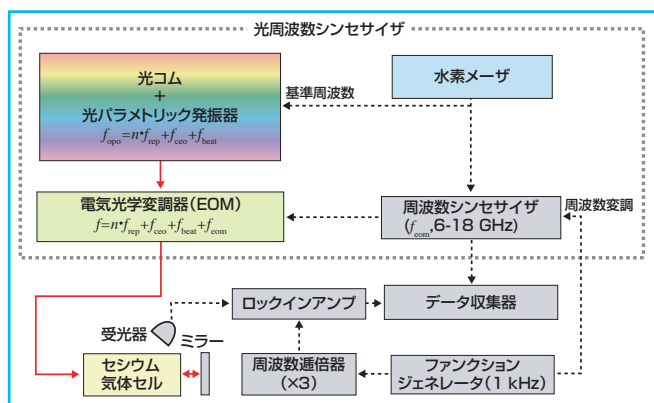


図2 光周波数シンセサイザを用いたセシウム原子の高分解能分光
光周波数シンセサイザの周波数を少しずつ変えながら、セシウム原子が発する蛍光の三次微分信号を検出し、飽和吸収分光を行う。

連続発振光周波数シンセサイザ

これまでに、われわれは広帯域にわたり連続発振が可能な光パラメトリック発振器 (OPO) を用いて、光コムへの位相同期¹⁾ およびいくつかの原子の線形吸収の観察²⁾ を行ってきた。ごく最近、電気光学変調器を併用することで、10 GHz以上の広帯域にわたる連続周波数同調を実現した。

まず連続発振光周波数シンセサイザを実現するために、図1に示すようなシステムを開発した。このシステムは、水素メータと呼ばれる高安定発振器、マイクロ波周波数に基づいた光周波数帯に発生させる光コム、光コムに位相同期させることができる広帯域連続発振光源であるOPO、そして広範囲にわたり連続的に周波数を可変するための電気光学変調器 (EOM) により構成されている。

水素メータは国際原子時^{*}と常に比較されており、それ自身を周波数標準源として利用することができる。光コムでは、この基準信号を用いて、図中の繰り返し周波数 f_{rep} とキャリアエンベロープオフセット周波数 f_{cco} を固定する。すると、 f_{cco} をゼロ本目として n 本目の光コムの周波数は $f(n) = f_{cco} + n \cdot f_{rep}$ となる。そして、OPOを n 本目の光コムに位相同期することにより、このOPO

が発生する光周波数もまた、水素メータから合成されたものとなる。さらに、この出力をEOMに入力することにより、10 GHzを超える範囲での連続的な周波数可変ができる。これらを一つのシステムと考え、正確無比な水素メータのマイクロ波周波数 (10 MHz) を入力すると、同じように正確無比で、かつ好きな波長帯 (色) の光周波数が出力できるということになる。

超高分解分光の実現

このシステムを用いた分光実験系を図2に示す。光周波数シンセサイザで発生した光をセシウム原子の入った気体セル中に入力して往復させる。これは、飽和吸収分光と呼ばれ、高速で運動する気体原子の吸収周波数における吸収信号がドップラー効果の影響を受けないようにする方法である。そして、光周波数シンセサイザの出力周波数を少

ずつ変えながら、セシウム原子が発生する蛍光を観察する。この場合、S/Nの面で有利なロックイン検出が一般的であり、ここでは三次微分信号を観察した。その結果を図3に示す。図中の各点がある光周波数に対応しており、その周波数の正確さは13桁以上である。測定された線幅は約5 MHzで、セシウム原子の自然幅である。光周波数シンセサイザの正確さや分解能にはまだまだ余裕があるということであり、より線幅の狭い対象の測定も可能である。

今後の展開

今後、パワーの増大、光コムのファイバレーザ化が実現できれば、ほかの光源では得られない波長帯において、光周波数が正確で、狭い線幅を持ち、かつ常につけっぱなしが可能な究極の光源を目指すことができるものと考えている。

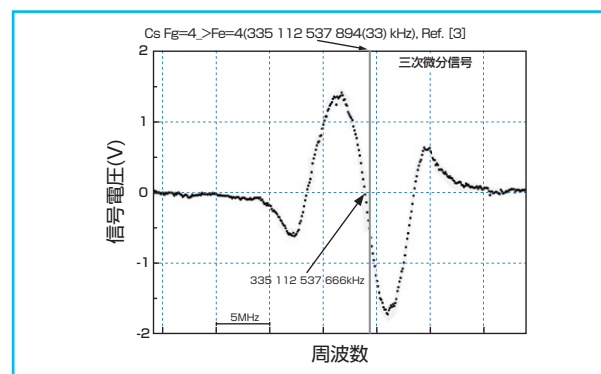


図3 観測されたCs-D1線 (895 nm) からの蛍光の三次微分信号
波長 895 nmにあるセシウム原子のD1線中にある4つの超微細構造の一つを観測したものである。周波数同調にはEOMを用いた。中心値は過去に報告された値³⁾と300 kHz以内で一致している。

用語解説*

- ◆ 国際原子時：世界各国の原子時計の平均を、一部の先進国のみが保有する一次周波数標準器により校正された時系：周波数標準

関連情報

- 共同研究者：池上 健、洪 鋒雷、大苗 敦、美濃島 薫、尾藤洋一、シプリ・トーマス、大嶋新一、松本弘一 (計測標準研究部門)。
- 1) H. Inaba et al., IEEE J. Quantum Electronics, Vol.40, No.7929-936 (2004).
- 2) 池上 健: AIST Today5月号 (2005)。
- 3) Th. Udem et al., Physical Review Letters 82, 3568-3571 (1999)。