

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610121

研究課題名(和文)高安定光共振器によるマイクロ波-光周波数リンク

研究課題名(英文)Link between microwave and optical frequency via a highly stable optical cavity

研究代表者

小林 淳(Kobayashi, Jun)

京都大学・理学研究科・特定准教授

研究者番号：50579753

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、光共振器の周期的な共振周波数と、光コム等の等間隔に並ぶ周波数スペクトルの類似性に着目し、高安定な光共振器の共振周波数間隔(FSR)を精密に評価することによって、“光共振器型の光コム”の実現を目指した研究である。

期間内に、Fiber型のEOMを使った手法によって、高安定な光共振器のFSRの高精度な評価に成功した。また、この光共振器を周波数のものさしとして用いることで、1 μ m付近の2本のレーザーの2THzの周波数差を1kHzの精度で評価することに成功した。さらにこのレーザーを用いることで、KRb分子の振動準位間隔(~2THz)を数kHzの精度で評価することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we focused on the similarity between the periodicity of the resonant frequency of the optical cavity and the periodicity of the laser spectrum of the optical comb. And we tried to develop an "optical comb by optical cavity" by precisely measuring the period of the resonant frequency (free spectral range, FSR) of a highly stable optical cavity.

During the research period, we successfully measured the FSR of a highly stable optical cavity precisely by using a fiber-type EOM. Moreover by using this cavity as a frequency ruler, we succeeded in measuring the frequency difference (about 2 THz) of two lasers around 1 μ m wavelengths in the precision of 1 kHz. And using these lasers, we performed a spectroscopy of ultracold KRb molecule, and we succeeded in the evaluation of the vibrational energy (about 2 THz) of the KRb molecule in the precision of a few kHz.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：精密分光 冷却原子 分子分光

1. 研究開始当初の背景

近年、モードロックパルスレーザーを使った光コムが開発されて、光格子時計等の超高精度分光の絶対周波数評価や周波数比較等の応用が広く行われるようになってきている。

2005年のノーベル物理学賞にも見られるとおり、この成果は非常に注目すべき大きな成果であるが、モードロックパルスレーザーが高価であったり、また実際に運用する際にモードロックパルスレーザーを安定的に発振させることが難しかったりするなどの技術的問題点があり、誰もが気軽に使える装置とは呼べないものであった。そのため、本研究では、より簡便で安定的な運用が可能となる光コムの開発を目標として研究を始めた。

2. 研究の目的

本研究では、光共振器の周期的な共鳴周波数と、モードロックパルスレーザーの周期的な周波数スペクトルの類似性に着目し、高安定な光共振器の共鳴周波数間隔(Free spectral range, FSR)を高精度に測定することで、『光共振器型の光コム』として使うことを提案し、実際にその開発を行った。『光共振器型の光コム』は、真空中に置かれた2枚のミラーで構成された単純な光共振器のことであり、その構造は非常に単純で安定的な運用が可能という特徴を持つ。

特にFiber型のEOMを用いて非常に深い位相変調を加えることで、レーザー周波数スペクトルに高次のサイドバンドを誘起することを使った、高精度なFSR評価方法を提案している。

この手法で実際にFSRの高精度評価を行うことが初めの目標であり、実際に光共振器を光のものさしとして用いることで、周波数の大きく離れた2つのレーザーの周波数差比較や、マイクロ波周波数とレーザー周波数をリンクさせるなど、光コムと同様な機能を実現することを目的としている。

3. 研究の方法

(1)本研究はまず、高安定でかつ高フィネスな光共振器を作成する。その後、この光共振器に、共鳴するレーザーを入射してFSRの測定を行う。その際レーザーに対して、Fiber型のEOMを用いた高次のサイドバンド励起を行い、このサイドバンドがすべて光共振器に共鳴するように、サイドバンドの励起周波数をLockすることで励起周波数とFSRを一致させて、FSRを高精度に評価する。

光共振器に用いるミラーには誘電体多層膜のコーティングが用いられるが、このコーティングは一般に有限の大きさのGDD(Group Delay Dispersion)を持つため、FSRはわずかに波長に依存してしまう。そこでレーザーの波長を、少しずつだが幅広く変えながらFSRを測定する。このようにして評価した各波長でのFSRをつなぎ合わせることで、わずかに周波数間隔がずれていく周

波数の櫛(光コム)が生成される。

(2)光共振器のミラーの性能から、高Finesseな光共振器として動作できる波長範囲は限られているが、その範囲内であれば、長波長側の櫛と短波長側の櫛の周波数差は、それらの櫛の間隔をすべて足し合わせたものとなるため、上記のFSR測定と同じ精度での評価が可能となる。すなわちTHzオーダーの周波数差を持つ2本のレーザーの周波数差を高精度に評価するという、光コムと同様な機能が実現される。

(3)上記の2本のレーザーを用いて、具体的な分光実験に応用する。本研究では極低温に冷却したKRb分子を用いて、 $X^1\Sigma^+$ 状態の振動準位 $v=0$ と $v=1$ の間の誘導Raman遷移分光を行い、その周波数差を上記の方法で高精度に評価できる。すなわち分子の振動準位間隔を高精度に決定する。

(4)絶対周波数の分かっている光学遷移を観測し、そのレーザー周波数を使って光コムの1つの櫛の絶対周波数を評価することによって、光コムのすべての波長域での絶対波長の評価が可能となる。そのために、絶対周波数がよく知られた原子の分光を行う。

4. 研究成果

(1)①高安定高フィネス光共振器の作成

高安定な高フィネス光共振器は、長さが非常に安定なスペーサーに、2枚のミラーを向かい合わせて張り合わせることで作成する。今回はスペーサーとして、熱膨張係数が非常に小さい合金と知られているスーパーインバーを用いた。またさらに安定度を増すために光共振器自体は真空中においている。ミラーとしては分子分光に用いる1 μ m付近で高反射となる市販のミラーを購入し、上記のスペーサーに貼り付けた。特にGDDが小さくなるコーティングを選んでいる。

②FSRの評価

FSRを評価するためにFiberタイプのEOMを用いて多数のサイドバンドを誘起する方法を用いた。このとき印加するマイクロ波周波数を制御することで、すべてのサイドバンドが光共振器に共鳴するように安定化する。この手法で、およそ1.5GHzのFSRを1Hzの精度での測定を実現した。さらにレーザーの周波数を少しずつ変えながら9THzの周波数範

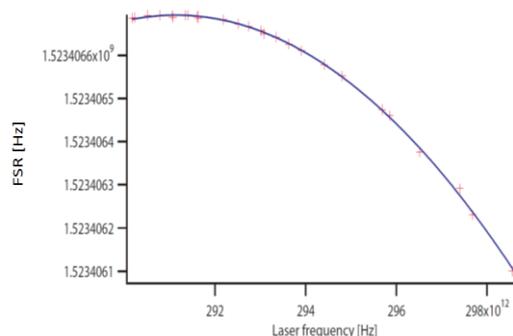


図 1 : FSR の測定結果

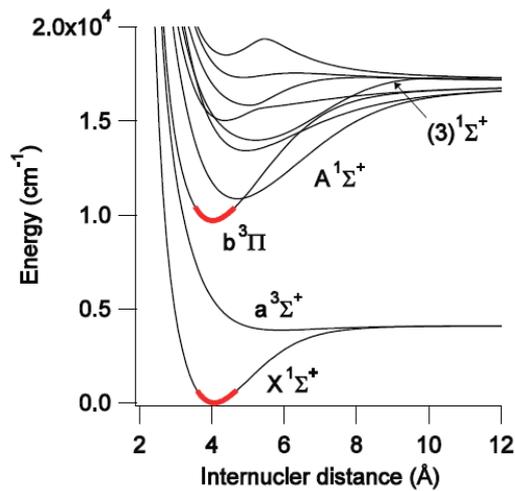


図 2 : KRb 分子のポテンシャル

囲に対して FSR を測定した(図 1)。またこの測定からは GDD の大きさも評価可能であり、期待していたスペックどおり、GDD が十分に小さいミラーであることが確認できた。

(2) 光コムとしての性能

ミラーのコーティングの範囲内で、上記の測定を行い、FSR の周波数依存性を正確に評価した。この光共振器は 290-299THz (波長で言えば 1003-1034nm) の範囲の任意の 2 本のレーザーの周波数差をおよそ 9 桁の精度で評価可能な光コムとして、機能することが分かった。

(3) KRb 分子の分光

我々の研究室では、極低温に冷却された K 原子と Rb 原子から極低温の KRb 分子を生成し、その分子の分光を行う装置を開発している。この装置を用いて、 $X^1\Sigma^+$ の振動基底状態付近と、 $b^3\Pi_0$ の振動基底状態間の分光実験を行っている。本研究では上記の光共振器に安定化された 2 本のレーザーを用いて、 $b^3\Pi_0$, $v=0$ を中間状態とした $X^1\Sigma^+$, $v=0$ と $X^1\Sigma^+$, $v=1$ の間の誘導ラマン断熱遷移(STIRAP)の分光を行った(図 2)。これらの 2 本のレーザーの周波数差は $X^1\Sigma^+$, $v=0$ と $v=1$ の間のエネルギー差に相当しており、具体的にこのエネルギー差を 2.216 363 642(5)THz と kHz の精度で求めることができた。この分光の周波数精度を制限しているのは分光実験の S/N であって、レーザー周波数の評価精度はそれよりも十分に高いものである。この評価方法を用いる前は、Raman 遷移の 2 本のそれぞれのレーザーの周波数を波長計を使って評価するしかなかったため、振動準位間隔も 2.216(2)THz という非常に低い精度でしか評価できていなかった。今回の光共振器型の光コムを用いた方法で、およそ 5 桁の精度の向上を実現した。

(4) Yb 原子の時計遷移の分光

レーザー間の周波数差だけでなく、レーザーの絶対周波数の評価を目指し、絶対周波数の分かっている遷移の分光を目指した研究も行った。ただし、研究期間内に私の所属する

研究室が変更になったため、分光に用いる分子を変更して、KRb 分子から Yb 原子に変えた。特に Yb 原子は絶対周波数の評価がすでに高精度に行われている光学遷移(1S_0 - 3P_0 遷移)が知られているため、その遷移の分光を目指した研究も平行して行った。研究機関内には達成できなかったが、近日中に 1kHz 以下の分光精度での分光が達成可能となるめどは立っており、現在進行中である。

(5) まとめと今後の展望

本研究で得られた成果としては、光共振器型の光コムの原理的な検証は行うことができた。ただし、光コムのすべての機能を代替できるわけではなく、①波長範囲が、光共振器の波長範囲に限られる(ここでは 1000-1030nm 程度)。②精度がおよそ 9 桁程度。③周波数差の比較は可能だが、絶対周波数の評価ができていない、といった状況にある。

今後の発展として、これらの改善を行うことで、よりパルスレーザー型の光コムに近く機能を持たせることができる。

①については、より広波長域で使用可能なミラーを特注すれば問題なく解決可能であり、またほとんどの用途では、使用する波長は限られるため、それに合わせてミラーを購入すれば解決できる。また、②の周波数精度については、2THz の周波数差に対して数 kHz の精度であり、これは一般に行われている分子分光に対しては十分な精度を与えている。ただし、原子分光による周波数標準を目指した超高精度な研究等には不十分である。③については、ミラーの波長域を 1 オクターブまで拡張し、さらに非線形結晶等を使って 2 倍波への波長変換をしたレーザーを光共振器で測定することによって、マイクロ波周波数だけで光の絶対周波数を決定することができる。ただし、そのためには 1 オクターブまで波長を連続的に掃引可能なレーザー光が必要となり、本研究では実現は難しかった。

ただし、現実的には光共振器型の光コムは非常に安定であるため、一度絶対周波数の分かっているレーザー光を用いて、ある櫛の周波数を特定しておけば、その他のレーザーの絶対周波数をその基準周波数からの差として、高精度に評価可能となる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

[1] K. Kato, Yujun Wang, J. Kobayashi, P. S. Julianne, and S. Inouye Isotopic Shift of Atom-Dimer Efimov Resonances in K-Rb Mixtures : Critical Effect of Multichannel Feshbach Physics Phys. Rev. Lett. 118, 163401 (2017) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.163401

[2] Ryuta Yamamoto, Jun Kobayashi, Takuma Kuno, Kohei Kato and Yoshiro Takahashi, An ytterbium quantum gas

microscope with narrow-line laser cooling, New Journal of Physics 18 023016 (2016)
査読有 doi:10.1088/1367-2630/18/2/023016

[3] Jun Kobayashi, Atsushi Ogino and Shin Inouye Ultracold molecular spectroscopy: toward the narrow-line laser cooling of molecules, New Journal of Physics 17 035013 (2015) 査読有 doi: 10.1088/1367-2630/17/3/035013

[4] Jun Kobayashi, Kiyotaka Aikawa, Kohei. Oasa, and Shin Inouye, "Prospects for narrow-line cooling of KRb molecules in the rovibrational ground state", Phys. Rev. A 89, 021401(R) (2014) [Editors' suggestion]. 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevA.89.021401

[学会発表] (計 8 件)

[1] 発表者名: Jun Kobayashi(招待講演)
会議名 CEMS Topical Meeting on Cold Atoms

場所 埼玉県和光市

日時 2016 年 6 月

タイトル “An ytterbium quantum gas microscope with narrow-line laser cooling”

[2] 発表者名: 小林淳(招待講演)

会議名 第7回光領域および精密周波数発生の回路技術調査専門委員会

場所 茨城県つくば市

日時 2015 年 6 月

タイトル “冷却分子の精密分光による基礎定数変化の検証実験”

[3] 発表者名: 小林淳, 蔡恩美, 山中修也, 櫻勇人, 山本隆太, 加藤宏平, 高橋義朗

タイトル: 分子の量子気体顕微鏡観測

学会名: 日本物理学会 2016 年秋季大会発表

場所: 金沢大学角間キャンパス

発表年月日: 2016 年 9 月 13 日-16 日

[4] 発表者名: 山本隆太, 小林淳, 加藤宏平,

久野拓馬, 櫻勇人, 高橋義朗

タイトル: ファラデー量子気体顕微鏡による単一原子イメージング

学会名: 日本物理学会第

71 回年次大会

発表場所: 東北学院大学

発表年月日: 2016 年 3 月 19 日-22 日

[5] 発表者名: 山本隆太, 小林淳, 加藤宏平,

久野拓馬, 櫻勇人, 高橋義朗

タイトル: 狭線幅レーザー冷却を用いたイッテルビウム原子の量子気体顕微鏡

学会名: 日本物理学会 2015 年秋季大会

発表場所: 関西大学千里山キャンパス

発表年月日: 2015 年 9 月 16 日-19 日

[6] 発表者名: 加藤宏平, 長田有登, 小林淳, 井上慎

タイトル: ^{41}K - ^{87}Rb 混合系の原子・分散乱におけるエフィモフ共鳴の観測

学会名: 日本物理学会第 70 回年次大会

発表場所: 早稲田大学早稲田キャンパス

発表年月日: 2015 年 3 月 21 日-24 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 淳(KOBAYASHI Jun)

京都大学・大学院理学研究科・特定准教授

研究者番号: 50579753