

光周波数コムを用いた自動高精度周波数測定システムの開発とその応用

量子・物質工学専攻 植田研究室 橋本並樹

1 はじめに

近年、光通信の普及に伴い通信容量の需要が拡大している。その拡大に答えるために様々な技術開発が行われている。その中に多重化通信というものがある。多重化の方式には「時間分割多重方式」、「波長分割多重方式」、「空間分割多重方式」がある。

波長分割多重方式において通信容量を拡大させるために多重度を上げるには、今まで以上の精度での波長管理が必要となる。

また、新たな通信周波数帯域を開拓するには、その帯域で周波数基準となるものが必要となる。現在、電気通信技術に関する国際標準化機構であるITU-T(International

Telecommunication Union – Telecommunication standardization sector: 国際電気通信連合-電気通信標準化部門)

が認定している光通信の周波数標準はアセチレン $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ の $\nu_1+\nu_3$ 遷移であるP(16)吸収線のみである。そのため、新たな周波数帯域では第一周波数標準から求めた第二周波数標準が必要である。われわれの研究室では第一周波数標準として認定されているアセチレン安定化半導体レーザー光源と光周波数コムを用いて、第二周波数標準となりうる分子の吸収線の測定を行っていた。そのときの測定方法は、

光周波数コムをアセチレン安定化光源に安定化させ、絶対周波数精度を 10^{-10} で確定する

波長計を用いてprobe光の周波数を 10^{-7} の精度にて測定

probe光とアセチレン安定化光源の周波数差から間に存在するコム数を計算

probe光を掃引し、光コムとのbeat信号をRF-SA(RF-Spectrum Analyzer)を用いて10kHzの精度で測定すると同時に、試料セルの透過パワーを測定

透過スペクトルを関数でfitし吸収中心を決定する

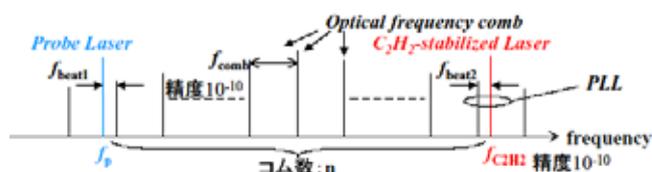


図 1: 光コムの発生帯域と他光源の周波数

と大変煩雑なものであり、また次数測定のために波長計を使うなど、全体のシステムとして大きなものであった。そのため、本研究では波長計測システムの操作の簡便化・高速化を行うと同時に、波長計を用いずRF信号のみで周波数計測が可能なシステム構築を目標とした、絶対周波数を確定できる高精度自動周波数測定システムの構築を行った。周波数決定精度は、計測機器の校正に必要といわれている 10^{-10} を目標とした。

2 原理

数100THzと大変高い周波数である光の周波数を測定する方法として、波長系などで波長を測定し、それを周波数に変換することで間接的に周波数を測定していた。そ

のため、分散により高い精度で周波数を決定することが難しかった。今回、光周波数コムを用いた周波数の直接計測によって高精度に周波数を決定することを試みた。

数 100THz と大変高い周波数を直接計測することは大変困難であるため、直接計測可能な周波数にまで周波数変換する必要がある。そこで、被測定光の近くの周波数帯域に光コムを発生させることで、光コムと被測定光を周波数混合し直接計測可能な周波数まで周波数を落とすことができる。こうして、被測定光の周波数を直接計測できる。この測定に必要な要素は、

- 絶対周波数の確定した光コムの発生
- 観測している差周波を発生させている光コムの次数の決定
- 差周波を 10kHz 以下の誤差で決定

である。

2.3 絶対周波数の決定した光コムの発生

EOM(Electro Optic Modulator : 電気光変調器)型光周波数コム発生器(OFCG)に周波数 f_0 の光を入射させ、OFCG内部に設置されているEOMの変調周波数を f_{comb} とした場合、入射光の電場 E_0 はEOMによって位相変調を受けるため

$$E(t) = E_0(t) \exp(j\phi_m \sin(2\pi f_{comb} t))$$

となる。 ϕ_m はEOMの変調指数である。位相変調に相当する項をフーリエ級数展開すると

$$\begin{aligned} \exp[j\phi_m \sin(2\pi f_{comb} t)] &= \{J_0(\phi_m) \\ &+ J_1(\phi_m) \exp(j2\pi f_{comb} t) + J_{-1}(\Delta\theta) \exp(-j2\pi f_{comb} t) \\ &+ J_2(\phi_m) \exp(j2(2\pi f_{comb} t)) + J_{-2}(\Delta\theta) \exp(-j2(2\pi f_{comb} t)) \\ &+ J_3(\phi_m) \exp(j3(2\pi f_{comb} t)) + J_{-3}(\Delta\theta) \exp(-j3(2\pi f_{comb} t)) \\ &+ \dots\} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\phi_m) \exp(jn(2\pi f_{comb} t)) \end{aligned}$$

となり、中心周波数 f_0 、コム間隔 f_{comb} の光コムが発生することが分かる。 $J_n(\phi_m)$ は、第一種ベッセル関数である。このことから、入射光の周波数を変化させることで光コムの中心周波数を変化させることができ、EOMの変調周波数を変えることでコム間隔を変化させることができることが分かる。また、コム間隔は数GHzと狭いため、光コムと他の光源との差周波の周波数は数GHz以下となり、周波数の直接計測が可能である。

今回、光コムの絶対周波数を確定させる方法として、アセチレン安定化半導体レーザー光源と光コムとの beat 信号を PLL (Phase Locked Loop)を用いて局部発信信号に安定化させることにより、光コムの絶対周波数を確定させる。

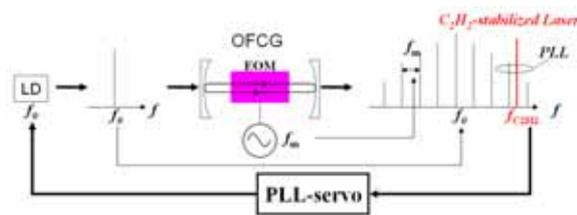


図 2 : 光コムの絶対周波数の確定

光コムの光源には外部共振器型半導体レーザー光源(ECLD)を使用した。ECLD は、内部に設置してある LD(Laser Diode)への電流値と Grating の角度によって出力周波数の操作を行う。Grating の角度は、Grating に設置してある PZT(圧電素子)の印加電圧を変えることによって制御する。

光コムと安定化光源との beat 信号を用いて周波数の安定化を行うため、光コムのサイドバンドと安定化光源の周波数線幅はともに狭いことが望ましい。ECLD の線幅は無制御時で 100kHz 以下と十分狭いのだが、アセチレン安定化光源の線幅は 3MHz 程度と不十分である。そのため、アセチレン安定化光源から出力された光に対し、AOM(Acousto Optic Modulator : 音響光変調器)を用いて周波数変調をかけることで線幅の狭窄化を行った。その結果、3MHz 程度あった周波数線幅が 15kHz に狭窄化された。

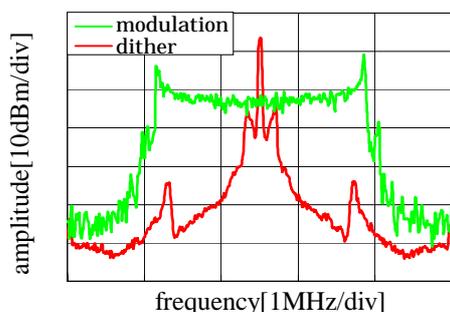


図 3 : 狭窄化による周波数線幅の変化

これらの光源を用いて光コムの周波数の安定化を行った。その結果、光コムと安定化光源とのbeat信号の線幅が 120kHz程度から 20kHz以下に変化したことから、安定化光源の線幅 20kHzより、光コムは安定化光源に対し 5kHz以下の精度で安定化していることが分かる。アセチレン安定化光源の絶対周波数精度は 100kHz以下であることから、光コムの絶対周波数が 10^{-10} の精度で確定した。

これにより図 1 から分かるように

$$f_p = f_{C2H2} - n \times f_{comb} - f_{beat1} - f_{beat2} \dots (1)$$

として、被測定光の周波数が決定する。ア

セチレン安定化光源の周波数 f_{C2H2} は既知であり、コム間隔 f_{comb} と光コムと安定化光源のbeat周波数 f_{beat1} は設定値あるので、測定によって得る必要がある値は被測定光とアセチレン安定化光源の間にあるコム数 n と被測定光と光コムとのbeat信号の周波数である。

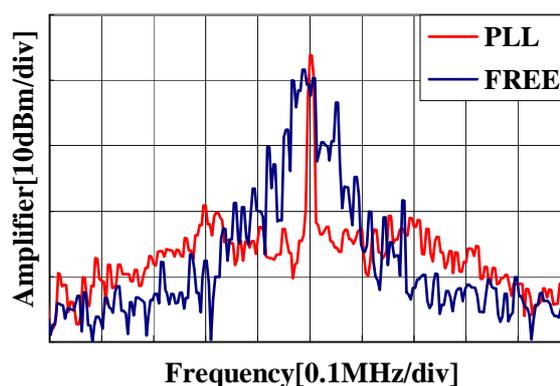


図 4 : 光コムの安定化光源への追従度

2.4 光コム次数の決定

過去の周波数測定において次数の決定は、波長計を用いて被測定光の周波数を 10^{-7} の精度で測定し、安定化光源と被測定光の周波数差からコムの次数を計算によって求めていた。他に、コム間隔の異なる 2 台の光コムを使用することで次数を決定する方法などがある。今回、新しいコム次数の決定方法として、コム間隔を変えることにより次数を決定する方法を考案した。

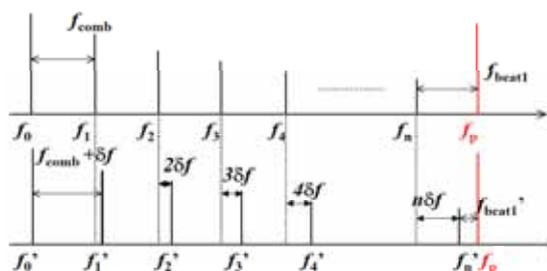


図 5 : コム間隔の変化による周波数変化

コム間隔を f_{comb} から $f_{comb}+\delta f$ に変化させた場合、1 次のサイドバンドの周波数はコム間隔を変化させる前と比べて δf だけ変化する。2 次のサイドバンドは $2\delta f$ 変化する。このことから、 n 次のサイドバンドは $n \times \delta f$ だけ変換することが分かる。観測している被測定光と光コムとのbeat信号の変化前後の周波数差を取ることで

$$f_{beat1} - f_{beat1}' = n\delta f$$

$$n = \frac{f_{beat1} - f_{beat1}'}{\delta f}$$

として、コムの次数が求まる。しかし、コム間隔を変えることでいくつかの問題が発生する。それらの解決方法について次項で述べる。

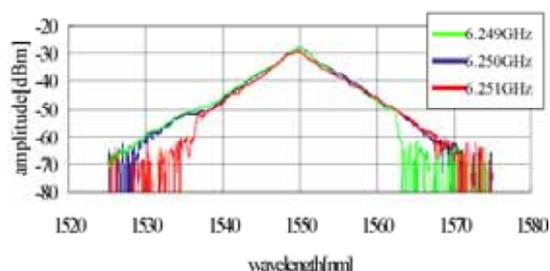


図 6 : 光コム発生中心のシフト

2.4.1 光コム発生中心のシフト

光コムを最も広帯域に発生させる EOM の最適周波数は、EOM の群速度分散と EOM との相互作用長を伸ばすために使用している共振器の共振器長によって決定される。今回の次数測定では変調周波数を最適値から変化させるため、図 6 のように光コムが確認できなくなる周波数帯域が発生する。そのため、変調数周波数を大きく変化させることはできない。今回、光コムと被測定光の beat 信号が確認可能な周波数帯域とし

て 5THz 程度確保するには、最適変調周波数である 6.25GHz から $\pm 500\text{kHz}$ の変化であれば問題ないことが分かった。

2.4.2 PLL 周波数引き込み帯域の拡大

光コムと被測定光との beat 周波数が変化すること、PLL によって安定化させている光コムと安定化光源との beat 周波数も変化することが分かる。その最大変化量は 800MHz 程度と PLL の周波数引き込み帯域からはずれてしまいます。そのため、PLL の周波数引き込み帯域の拡大が必要である。

今回、周波数引き込み帯域を拡大させる方法として、光コムの光源である ECLD の PZT の制御信号にオフセット信号を加えることで引き込み帯域の拡大を行った。これにより、引き込み帯域が数 10MHz 以下であったものを 800MHz 以上に拡大することができた。

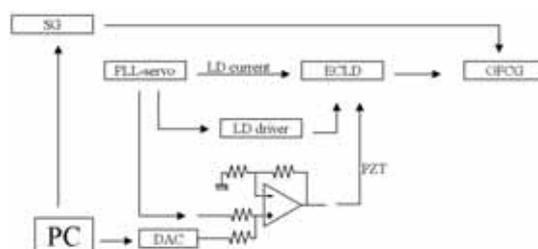


図 7 : PLL 周波数引き込み帯域の拡大

2.5 差周波信号の周波数決定

被測定光の周波数を 10^{-10} の精度で決定するには、beat 信号を 100kHz 以下の精度で決定する必要がある。

今回、beat 信号を測定する RF-SA (RF-Spectrum analyzer) は Rb 原子時計によって 5×10^{-11} にて安定化されているため、beat 信号の周波数測定精度には問題ない。

3 周波数測定システムの構築

3.3 周波数測定系

光コムを用いた周波数測定系は図 8 となる。

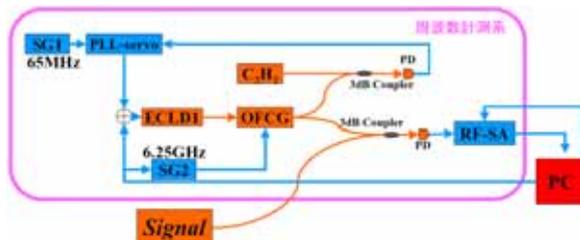


図 8 : 光コムを用いた周波数測定系

光コムの光源となるECLD1 の光をOFCGに入射し光コムを発生させる。EOMの変調周波数は、SG2(Signal Generator)から出力させる。発生した光コムとアセチレン安定化光源C₂H₂とのbeat信号とSG1からの信号をPLLに入力し、その誤差信号をECLD1に還すことで光コムの周波数を安定化させる。絶対周波数の確定した光コムと被測定光のbeat周波数をRF-SAで測定することで、式(1)より被測定光の絶対周波数が確定する。SG1、SG2、RF-SAはRb原子時計によって 5×10^{-11} で安定化させている。

光コムの発生帯域 5THz、コム間隔 6.25GHzの光コムにおいてコム間隔の周波数精度が 5×10^{-11} であることから光コムの周波数精度は 250Hzである。また、測定するbeat周波数は 6.25GHz以下であることから、その測定精度は 0.3125Hz以下である。以上により、この周波数測定システムの精度はアセチレン安定化光源の周波数精度である 100kHzが支配的であり、被測定光の周波数を 10^{-10} で決定できる。

また、各計測機器をPC上でソフトウェア制御することにより光コム次数測定、被測

定光の絶対周波数決定、吸収線測定時の関数 fit による吸収中心周波数の決定を自動化することが可能になった。

今回のシステムで測定可能な周波数帯域は、アセチレン安定化光源の周波数が 194.4THz、光コムの発生帯域 5THz であることから、測定可能な周波数帯域は 194.4 ± 5 THz である。

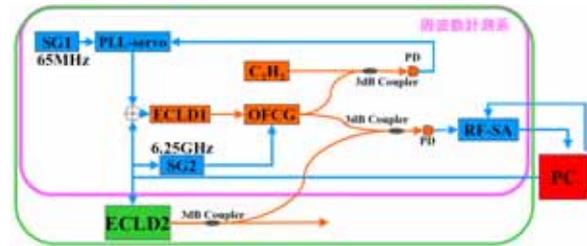


図 9 : 光シンセサイザー

3.4 光シンセサイザー

構築した周波数測定システムにPCによる周波数制御が可能な光源ECLD2 を追加することで、周波数精度 10^{-10} の光シンセサイザーとして使用することも可能である。

4 吸収線測定

構築した光シンセサイザーを用いて、H¹³C¹⁴Nの 2ν₃回転振動遷移の吸収線測定を行った。

4.1 実験系

吸収線測定実験系を図 10 に示す。HCN セルの透過パワーと参照光のパワーの比をとることで HCN の透過率を測定すると同時に周波数を測定することで、透過スペクトルを確認した。

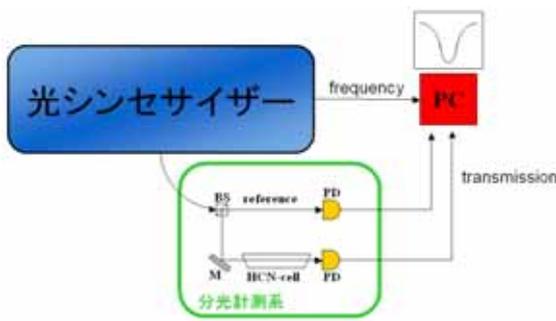


図 10：吸収線測定の実験系

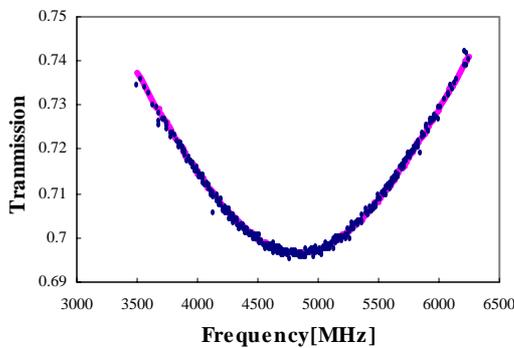


図 11：透過スペクトラム

4.2 実験結果

得られた透過スペクトルを図 11 に示す。

本来、透過スペクトルの関数 fit は vogit 関数で行うのだが、使用した試料の Doppler 広がりが 400MHz 以下であるのに対し圧力広がりが 4400MHz 以下と圧力広がりが支配的であり、吸収中心付近での関数 fit ということから Lorenz 関数で関数 fit を行った。その結果、吸収中心周波数は 4837.3MHz、fit 誤差は 1.26MHz となった。

アセチレン安定化光源の周波数が 194.4491817THz、コム間隔が 6.25GHz、コム数が 12、 $beat_1$ が 65MHz、セル圧力 95.02Torr、セル圧力誤差による周波数誤差 1.65MHz。以上の値を用いて、式(1)より

$$f_p = f_{C2H2} - n \times f_{comb} - f_{beat1} - f_{beat2}$$

$$= 194.4491817(29)\text{THz}$$

と、吸収中心周波数が決定された。この値は過去の測定値よりも精度の高い値である。今回使用したセルの圧力精度があまり高くないことなどから、分光測定系を改善することで周波数決定精度の向上が考えられる

5 まとめ

第一周波数標準であるアセチレン安定化半導体レーザー光源と光周波数コムを用いた自動高精度周波数測定システムの開発を行った。

コム間隔を変化させることによるコム数の測定方法を考案することで、従来は波長計を用いてコム数を計算していたものを、RF-SA のみで求められるようになった。

各計測機器のソフトウェア制御による測定の自動化により、操作の簡便化、計測時間の短縮を行うことができた。これにより、測定可能周波数帯域 $194.4\text{THz} \pm 5\text{THz}$ 、周波数精度 10^{-10} の絶対周波数測定システムを構築することができた。また、機器のソフトウェア制御に伴い、周波数測定システムと ECLD を同時に制御することで、周波数精度 10^{-10} の光シンセサイザーとして応用することも可能になった。

開発した光シンセサイザーを用いて、 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ の $2\nu_3$ 回転振動遷移の R(0) 吸収線の周波数測定を行った。その結果、 $194.4491817(29)\text{THz}@95.02\text{Torr}$ として過去の測定結果よりも高い精度で周波数を決定することができた。この値は、圧力精度の高い試料を使用するなど分光計測系を改善することにより、さらに高い精度で周波数を決定が見込まれる値である。