

光周波数を用いた CO 分子の吸収線と 圧カシフトの周波数直接測定

量子・物質工学科 植田研究室 藤田僚平 0113087

研究背景・目的

光通信では 1.5 μm 帯と 1.3 μm 帯が用いられている。前者は伝送路である光ファイバー中での損失が最も小さく、後者は分散が最も小さい。

通信方式については、効率的でスケラビリティに優れる、WDM(Wavelength Division Multiplexing : 波長多重方式)が使われている。これは波長の異なる光それぞれに情報を乗せ、最終的に一本の光ファイバーで情報を伝送する方法である。

伝送容量を上げるには 1)装置・伝送路共に増設する 2)各波長毎の通信速度を上げる 3)多重度を上げる が考えられるが、1)については追敷設、維持管理等のコスト面で不利である。2)についてはすでに 40Gbps に達しており、電気素子の問題で大幅な高速化は難しい。3)については送受信機のチャンネル数の追加と、伝送路端での光波長合成/分離素子の交換が必要であるが、伝送路はそのままに伝送容量を向上させることができる。電気的な部分は基本的に既存技術で実現できる。利用チャンネル数(多重度)と伝送容量は単純に比例し、チャンネルには十分な余裕がある。これらのことから通信容量の向上は多重度の向上が最も効率的である。

ITU-T が規定するところの C バンド(1540~1560nm)が現在最も利用されている。40Gbps 160 多重が実用化されているが大容量化の要請はとどまることを知らない。現在チャンネル間の周波数間隔は主に 50GHz が使われている。周波数間隔詰めてのさらなる多重化にも限界が来る。

C バンドではバンド内にアセチレンの飽和吸収から第一周波数標準が定められており、それを基準にチャンネルの周波数が決められている。今後の通信帯域拡大に伴い L バンド(1565~1625nm)、S バンド(1480~1510nm)にも周波

数基準が必要とされている。図 1 に光通信バンドの割り当てを示す。

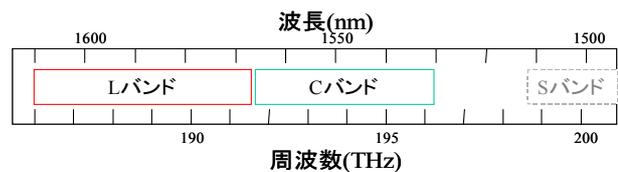


図 1: 光通信のバンド割り当て状況

本研究では L バンドの周波数基準候補として CO に着目した。 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ とその同位体、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ は 3v 回転振動遷移の吸収線が合わせて約 80 本あり、これらは L バンドの周波数帯域を十分に満たす物である。図 2 にそれぞれの吸収スペクトルを示す。

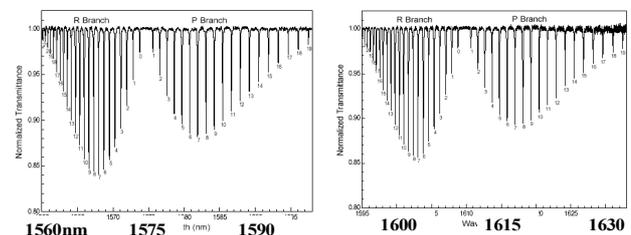


図 2: CO の吸収スペクトル 左: $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 右: $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$

我々の研究室では光周波数コムを用いた 1.5 μm 帯での高精度光周波数測定システムの確立に向けて研究を進めている。1.5 μm 帯は周波数にして 200THz 程度であり、電磁波のように直接高精度に測定する方法が確立されていない。本研究ではこのシステム確立の一環として、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ の吸収線周波数を第一周波数基準との差周波数直接測定により高精度にもとめ、第二周波数基準に定めることが目的である。目標とする精度は 10^{-10} とする。これは WDM 装置の製造・調整に要求される値である。過去の測定は波長測定であったために分散の影響を受け、精度は 5×10^{-9} 程度であった。

また、ガスの吸収線はその圧力によって分子間の平均距離が変わり、分子間の作用でエネルギー準位も変わり、結

果として周波数はずれる。これを圧力シフトという。過去の測定では、精度が 10^{-1} 程度であった。これについてもより精度よく測定することを試みた。

原理

第一周波数基準である C_2H_2 安定化レーザーと、CO の吸収線の周波数は 2THz 以上離れており、直接差周波数を求めるのは不可能である。そこで光周波数コム(comb:櫛)を用いる。これはレーザー光を位相変調する事で、数 THz 以上にわたって等周波数間隔のサイドバンドを発生させるものである。光周波数軸で等間隔な周波数の物差しとして使用できる。

C_2H_2 安定化レーザーと直近のコムとの差周波数 (f_{beat1} とする)、プローブレーザーとその直近のコムとの差周波数 (f_{beat2})、それらにあるコムの数(次数、N)がわかれば以下の式でプローブレーザーの周波数が求められる。

$$f_{probe} = f_{C_2H_2} - f_{beat1} - N \times f_{\Delta comb} \pm f_{beat2}$$

f_{probe} : プローブレーザーの周波数

$f_{C_2H_2}$: C_2H_2 安定化レーザーの周波数

$f_{\Delta comb}$: コム間隔の周波数

周波数関係のイメージを図 3 に示す。

f_{beat2} の符号については、 f_{probe} と直近のコムとの周波数関係で決定される。 f_{probe} の方が周波数が高い場合、符号は+である。 f_{beat1} のそれについては装置の設計からに決定している。

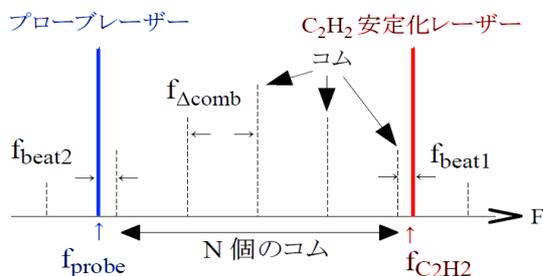


図 3: 周波数関係のイメージ

本研究では線幅の狭窄化を行った 10^{-10} の精度のアセチレン安定化レーザーに周波数コムを PLL(Phase Locked Loop : 位相同期)で周波数を制御し、 10^{-10} の精度で絶対周波数が確定された光周波数コムを使い周波数計測を行っ

た。

光周波数コム

共振器内に EOM(electro optic modulator : 電気光変調器)を置き、共振器内を光が往復する度に位相変調を掛け、広帯域にわたり光周波数軸上で等周波数間隔のサイドバンドを発生させる物である。図 4 に原理図を示す。

装置へ入射された光は、その光を中心に、外部から与えられる 6.25GHz 間隔のサイドバンドを多数発生させる。これらをコムと呼ぶ。等周波数間隔で並ぶことから”光周波数軸上での物差し”として利用することができる。

使用した光周波数コムの仕様は次の通りである。帯域: 5THz 周波数間隔:6.25GHz 周波数間隔精度: 10^{-10} (外部 Rb 発振器による)

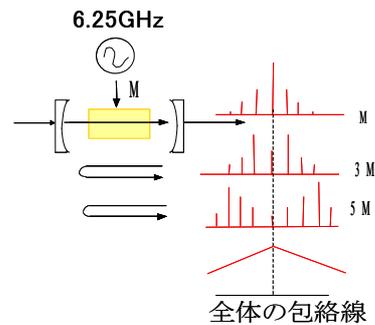


図 4: 光周波数コム発生器原理図

アセチレン安定化レーザー

今回使用した C_2H_2 安定化レーザーの構成図を図 5 に示す。これは $^{13}C_2H_2$ の遷移 $\nu_1+\nu_3$, P(16) の飽和吸収にロックして、194.3695694THz のレーザーを出力する。

温度の影響を押さえるためにセル圧が低く設定されている。そのために吸収が弱いので、セルをフィネス約 200 の共振器中に置いている。

ECLD(external cavity laser diode : 外部共振器型レーザーダイオード)から出射されたレーザーはセルの設置された共振器に入射される。共振器の反射光を用いて ECLD を共振器の共振周波数に一致させる。

C_2H_2 の吸収を共振器の透過光から検出し、これを用いて共振器長を C_2H_2 の吸収線周波数に一致させる。

結果として ECLD の周波数は C_2H_2 の吸収線周波数に安定化される。

C₂H₂の吸収線周波数に高精度にロックさせるためにロックインアンプが使われているが、原理上、変調を掛ける必要があり、C₂H₂安定化レーザーの線幅は自然幅よりも広がってしまう。

使用したC₂H₂安定化レーザーの仕様は次の通りである。
線幅: 3MHz 安定度: 10⁻¹³ 台 周波数再現性: 150KHz

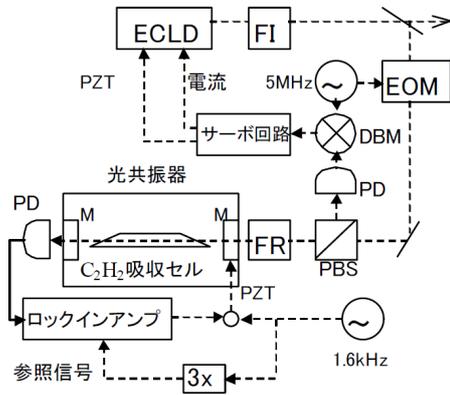


図 5: アセチレン安定化レーザーの構成図

アセチレン安定化レーザーの線幅の狭窄化

C₂H₂安定化レーザーではロックインアンプを利用しているため線幅が 3MHz 程度に広がっていた。線幅の狭窄化は AOM(acoustic optic modulator: 音波光変調器)によって逆相で変調を掛けることによってうち消す物である。図 6 に狭窄化装置の構成図を示す。

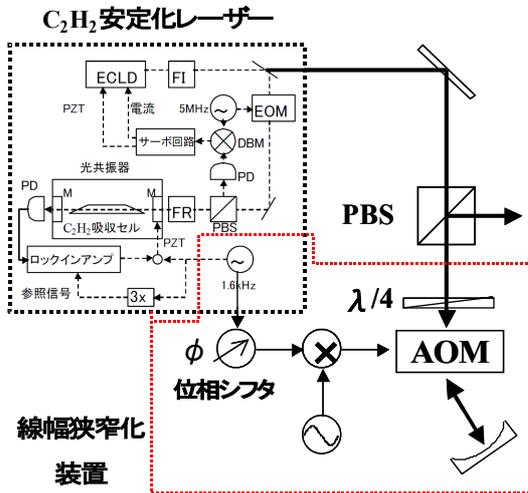


図 6: 狭窄化装置の構成図

C₂H₂安定化レーザーのロックインアンプの変調に使われる 1.6KHz を取り出す。系での遅延などを補償するために移相シフトを通したあと AOM に入力され、変調をうち消す。素子中に発生させた疎密波をグレーティングとして利用する AOM は 1.6KHz では駆動させることができないので 80MHz をデビエーション約 1.7MHz の 1.6KHz で FM 変調

したもので制御している。

図の AOM 通過後の凹面鏡は AOM 通過時の屈折を補正するための物である。

狭窄化装置によって C₂H₂安定化レーザーの線幅は 3MHz から 140KHz となった。

なお、C₂H₂安定化レーザーの周波数はこの狭窄化装置を通したことで 160MHz 低くなる。これは AOM 通過中に疎密波からエネルギーを受けるためである。

実験方法

図 7 に実験装置全体の概略を示す。

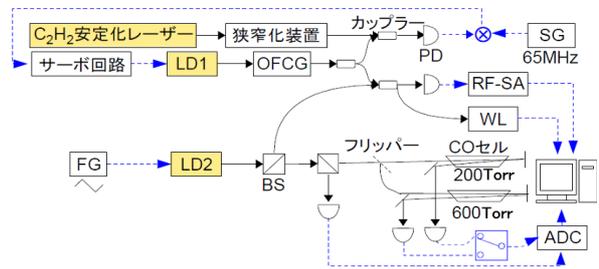


図 7: 実験形概略図

fbeat1 が 65MHz となるように LD1(→コム)をサーボで位相同期する。

プローブレーザー(LD2)の周波数を FG (function generator)を用いて吸収線付近で掃引し、LD2 の CO セル透過光強度を測定する。LD2 の非セル透過光強度も同時に計測することで、吸収信号中のレーザー強度変動成分を打ち消すことができる。

掃引時に波長計で LD2 の周波数の概値からコムの次数 N が求められ、fbeat2 は RF スペクトラムアナライザを用いて計測する。

今回は 200Torr と 600Torr の 2 本の CO セルを用いて吸収周波数を測定、圧力シフトを求めた。

結果

セルを透過した光強度と、セルを透過していない光強度の比から吸収が得られる。

線形吸収信号は Lorentz 型をとる圧力広がりや自然幅、Gauss 型をとるドップラー広がりやたたみ込み積分である、Voigt 曲線で表されるが、圧力広がりが支配的である吸収中

表 1: $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 吸収中心周波数と圧カシフト量

吸収線	200Torr		600Torr		圧カシフト [Mhz/Torr]
	吸収中心 [THz]	fit誤差 [Hz]	吸収中心 [THz]	fit誤差 [Hz]	
R(7)	191.1897988	2.503E+05	191.1897187	1.609E+06	-2.00E-01
R(8)	191.2765735	9.251E+05	191.2764902	1.352E+06	-2.08E-01
R(9)	191.3601681	4.496E+05	191.3600587	4.563E+05	-2.74E-01
R(10)	191.4405616	8.021E+05	191.4404879	8.708E+05	-1.84E-01
R(11)	191.5177684	3.876E+05	191.5176776	7.173E+05	-2.27E-01
R(12)	191.5917722	2.309E+05	191.5916851	6.269E+05	-2.18E-01
R(13)	191.6625724	3.264E+05	191.6624787	1.107E+06	-2.34E-01
R(14)	191.7301561	5.339E+05	191.7300620	1.048E+06	-2.35E-01
R(14)	191.7301577	4.216E+05	191.7300738	1.144E+06	-2.10E-01
R(15)	191.7945184	3.673E+05	191.7944279	6.274E+05	-2.26E-01
R(16)	191.8556823	4.549E+05	191.8556076	1.411E+06	-1.87E-01
R(17)	191.9136000	4.538E+05	191.9135049	9.501E+05	-2.38E-01
R(18)	191.9683119	3.861E+05	191.9682397	3.107E+06	-1.81E-01
R(19)	192.0197892	5.245E+05	192.0196750	4.148E+06	-2.86E-01
R(20)	192.0680192	1.877E+06	192.0678472	2.845E+06	-4.30E-01

心は Lorenz 曲線で近似できるので、本研究では中心周波数を求めるために、吸収信号を Lorenz 曲線に最小二乗法でフィットを行った。

線形吸収量は指数関数の形をとるので、リニアに戻してから非セル透過高強度との比をとらなければならないが、本実験の目的である吸収線中心周波数を求める場合はリニアに戻さなくても精度に影響するほどの差は生じなかったため、単純に光強度の比をとった。

結果を表 1 に示す。吸収中心周波数の測定精度は一部を除き 3×10^{-9} 程度であり、過去の結果より改善した。圧カシフトは精度 3×10^{-2} 程度で得られ、過去の測定より一桁以上改善した。

考察

$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ と $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ にはそれぞれ 40 ほどの吸収線があるが、そのうちのわずかな一部しか測定できなかった。また、一部では精度が過去の測定を下回った。

原因としては、1) コムの中心周波数とプローブレーザーとが離れすぎ、ビートが弱く周波数が決定できない。2) CO の吸収が弱いため光強度測定の精度が悪い。が挙げられる。解決方法としては、1) コムを周波数の低い側へシフトし、狭帯域化 C_2H_2 安定化レーザーと位相同期させるコムの周波数を高い方へシフトする。または帯域のより広いコムを使う。2) CO の実効吸収長伸ばす。具体的には本研究では各セル 2 パスで吸収させたが、パス数を増やすか、単純にセルを複数用いる。などが考えられる。2) について、共振器中にセルを置くのは、プローブ光を広範囲に掃引して吸収中

心を得るので適さないと思われる。

今後の展望

セルの温度管理を行う。本実験では特に 600Torr セルでの精度が悪い。セル圧は温度に依存し、セル圧力が高いほど影響は大きい。目標とする 10^{-10} の精度を得るには温度にして 0.25K 以下の誤差で温度管理が必要である。

残りの吸収線の吸収中心周波数測定を行う。本研究で用いたコム(帯域 5THz)の周波数をシフトしても 12THz もの帯域に広がっている $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ と $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ の全ての吸収線の測定は不可能である。導波路型コム(帯域 15THz)などの利用が必要である。また、プローブレーザーの LD の可変域も広帯域化する必要がある。

参考文献

- 1) W. C. Swann and S. L. Gilbert, J. Opt. Soc. Am. B. **19**, pp.2461-2467 (2002)
- 2) N. Picque and G. Guelachvili, J. Mol. Spectrosc. **185**, pp.244-248 (1997)
- 3) 中川賢一 植田憲一 武者満 光波長多重通信用の絶対周波数基準光源の研究開発
- 4) 橋本 並木 アセチレン安定化半導体レーザー光源の線幅狭帯域化(2005) ※卒研
- 5) 田村 洋介 光周波数コムを用いた CO 分子吸収線の周波数測定(2005) ※卒研