レーザーオリジナル

3.51 μm 周波数オフセットロック He-Xe レーザー

大津元一*・田幸敏治*

(1980年7月23日 受理)

Frequency-Offset-Locked He-Xe Laser at 3.51 μm

Motoichi OHTSU* and Toshiharu TAKO*

(Received July 23, 1980)

A highly stabilized frequency-offset-locked He-Xe laser system is constructed for the high resolution laser spectroscopy of H_2CO ($5_{1,2}(\nu=0) \rightarrow 6_{0,6}(\nu_s=1)$) at 3.51 μm . It is composed of two He-Xe lasers. The first laser is the H_2CO -stabilized He-Xe laser which is used as a frequency reference. The second laser is frequency-offset-locked to the first laser by using the beat frequency between these lasers. The frequency stability of the first laser is 1.0×10^{-14} at $\tau=100$ s, where τ represents the integration time. The frequency traceability of the second laser to the first laser is expressed as $8.0 \times 10^{-13} \cdot \tau^{-1}$ for $10\text{ms} < \tau < 100$ s. It is found that this value of the traceability was independent of the frequency modulation of the first and second lasers. The variable range of the frequency of the second laser is 18 MHz. In this range, the frequency traceability of the second laser to the first laser is independent of the beat frequency.

1. まえがき

近年、各種の高分解能レーザー分光が発達してきた。レーザー分光の高分解能化のためにはレーザー周波数を安定化することが必要である。従来、各種分子の飽和吸収線を用いた安定化レーザー (3.39 μm CH_4 安定化 He-Ne レーザー¹⁾, 633 nm I_2 安定化 He-Ne レーザー²⁾, 10.6 μm CO_2 安定化 CO_2 レーザー³⁾ など) では周波数安定度は $10^{-10} \sim 10^{-13}$ に達しているが、周波数を可変にすることはできない。これらを用いて分光測定を行なう場合には Stark 効果などにより測定対象の原子・分子スペクトルの周波数掃引を行なう必要がある。この場合、原子・分子に加

える外場により測定対象スペクトルの状態が乱されることなどの理由により 10^{-10} 以上の高分解能が必要な場合には必ずしも有利ではない。そこで周波数が高度に安定化され周波数が可変のレーザーの開発が望まれる。さらに微弱信号測定の際にはレーザー周波数を変調でき測定の高感度化が計れることが必要であり周波数変調・無変調の両方を実現できるようなレーザーでなくてはならない。

以上のような背景のもとに筆者らは H_2CO ($5_{1,2}(\nu=0) \leftarrow 6_{0,6}(\nu_s=1)$) の飽和吸収分光、分子ビーム分光を高分解能・高感度で行なうための、周波数が安定化されかつ可変の 3.51 μm He-Xe レーザー、すなわち 3.51 μm 周波数オ

* 東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田4259)

* Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology 4259 (Nagatsuta, Midori-ku Yokohama 227)

フセットロック He-Xe レーザーを開発した。本論文ではこのレーザーの性能について報告する。なお、ここで用いる周波数オフセットロックの方法は単に分光用光源としてではなく各種計測用レーザー、通信用レーザーなどへも広く応用される可能性を有するものである。

2. 実験装置

装置の開発にあたり次の性能が得られることを目標とした。

- (1) 分光測定の際の分解能 10^{-10} 程度を得るためにレーザーの周波数安定度 $\sigma \leq 1 \times 10^{-12}$ ($\tau = 1$ s) であること。ここで σ は周波数安定度を表わすパラメータ, Allan 分散 σ^2 の平方根であり, τ はその測定の積分時間である。⁴⁾ 積分制御された周波数安定化レーザーでは $\sigma \propto \tau^{-1/2} \sim \tau^{-1}$ であるため分光測定の際には測定時間を長くする(すなわち τ を大きくする)方が有利であるが、ここでは測定対象である飽和吸収セル, 分子ビーム装置を含め全実験系の安定度のバランスを考え、一回の測定が約1時間以内で終ること, すなわちレーザー周波数掃引の1ステップ当りの送り時間を1 s ~ 5 s とすることを目標としたため $\tau = 1$ s における上記 σ の値を便宜上の目標達成の目安とした。
- (2) スペクトル幅1 MHz 程度のスペクトル測定のために周波数可変範囲は10 MHz 以上で

あること。

- (3) 周波数変調および無変調が可能であること。

以上を同時に満たすようなレーザーを得るために Fig. 1 に示す装置を用いて実験を行なった。図中第1レーザーは H_2CO ($5_{1,5}(\nu=0) \rightarrow 6_{0,6}(\nu_5=1)$) の飽和吸収線の中心周波数に周波数安定化した $3.51 \mu\text{m}$ He-Xe レーザーであり、これは周波数基準発振器として用いられる。第2レーザーが $3.51 \mu\text{m}$ 周波数オフセットロックレーザーである。すなわち、第1レーザーとの間でビート信号を検出し、そのビート周波数が高安定周波数シンセサイザーからの出力周波数値に一致するように第2レーザー周波数を制御する。これにより第2レーザーの周波数は第1レーザー、すなわち周波数安定化レーザーの周波数に追従して安定化される。ここで周波数シンセサイザーの出力周波数を掃引すれば、2台のレーザー間のビート周波数が掃引され、従って第2レーザーの周波数も掃引される。このようにして第2レーザーは第1レーザーの周波数と同程度の安定度を保ち、かつ周波数可変のレーザーになりうる。図中、第1レーザーについては他で報告してあるので詳細は略する。^{5), 6)} 両レーザー間のビート信号は InAs 検出器で検出し、広帯域増幅器 A で増幅し、ディスクリミネータにより TTL レベルに変換する。その周波数を分周器により 1/10, または 1/20 に分周する。この出力信号の位相と周波数シンセサイザーの出力信号の位相とを位相比較器 ϕ/V によって比較し、その位相差に比例する電圧値を得る。この出力電圧を PZT 用電源(PZT driver)に入れてこれにより第2レーザーの共振器用鏡の1枚をマウントしている PZT を駆動し、第2レーザー周波数を制御する。

以上が周波数オフセットロックレーザーの制御系であるがこのうち重要な役割を果たすものが位相比較器と PZT 用電源である。まず位相比較器のブロック図を Fig. 2 に示す。周波数オフセットロックの方法を用いるときに問題となる点は2台のレーザー間のビート周波数の変動が大きい場合ビート信号と周波数シンセサイザ

Fig. 1. Experimental apparatus. ϕ/V : A phase comparator. A: A wide band amplifier. BS: Beam splitter. D: InAs detector. L: Lens. M: Mirror. P: Polarizer. PH: Pinhole Q: Quater-wave plate.

Fig. 2. The block diagram of the phase comparator.

Fig. 3. The block diagram of the PZT driver.

Fig. 4. The frequency dependence of the voltage gain of each amplifier in the PZT driver.

A: The integrating amplifier and the filter (-7 dB/decade).

B: The proportional amplifier.

C: The differential amplifier.

D: The sum of the values on the curves A and B.

E: The sum of the values on the curves A, B, and C.

ーの出力信号との位相差が大きくなり位相比較器のカウンターがオーバーフローすることである。ここで試作した位相比較器は12ビット2進カウンターを用い全加算器により周波数シンセサイザー出力信号とビート信号とのカウント数の差を作りアナログ信号に変換する方法をとっているため $\pm 2\pi \times 10^{11}$ radの位相余裕度を有し、このようなオーバーフローを避けることができる。このように広いダイナミックレンジを有することにより周波数オフセットロックを安定に行なうことが可能である。次にPZT用電源のブロック図をFig. 3に示す。ここでは長期安定度を向上させるために制御用増幅器として積分増幅器を用いている。これにフィルター (-7 dB/decade)を直列接続することによりさらに長期(低周波数)での制御利得を向上させている。さらに短期安定度も向上させるために比例増幅器、微分増幅器を並列に接続する。これらの増幅器の利得の周波数特性をFig. 4に示す。積分増幅器とフィルターとともに比例、微分増幅器を併用すると周波数帯域が約1 kHzまで拡大していることがわかる。レーザ共振器に組込まれた状態でのPZT(Burleigh PZ-80)の応答周波数帯域は約1 kHzであることが確認されているのでこのPZT用電源によりPZTの応答周波数帯域全体にわたり制御することができる。次にFig. 1に示した装置によって第2レー

Fig. 5. The block diagram of the Allan variance real-time processing system (the ARPS).

ザーの周波数を安定化したときにその安定度 σ を測定する必要があるがこのレーザーを分光実験に用いるとき σ を実時間で測定しモニターできれば都合がよい。このような要望から Allan 分散実時間測定装置(The Allan variance real-time processing system, 略して ARPS と呼ぶ)を開発した。⁷ そのブロック図を Fig. 5 に示す。マイクロプロセッサには 6802 を用いている。ビート周波数は 2 進カウンターとラッチで構成された周波数カウンターで計数される。この 2 進カウンターはリセットを行わずに常にオーバーフローしつづける方式をとっている。これによりカウントの際のゲートの閉じている時間, すなわち測定の空き時間を 0 にすることができる。Allan 分散測定の際にはこの測定の空き時間は 0 でなければ測定誤差を生ずるので,⁴ ARPS では上記の方法によりこの誤差を生じないよう工夫されている。従来 Allan 分散を計算する際市販の周波数カウンターを用いていたがゲートの閉じている時間が長く $\tau \geq 1$ s では誤差差が大きく測定不可能であった。⁸ これにくらべ ARPS ではこの誤差を消去でき $1 \text{ ms} \leq \tau \leq 10^3 \text{ s}$ まで測定可能となった。測定はキーボードと感熱プリンタを介し実時間で行なうことができる。

3. 実験結果と考察

まず周波数基準となる第 1 レーザーの周波数安定度の測定結果を Fig. 6 に示す。この H_2CO 安定化 He-Xe レーザーの周波数安定化の方法に関してはすでに報告してあるので,^{5,6} ここでは要点を記すに留める。測定は Fig. 5 の ARPS により実時間で行なった。制御に使用した PZT 用電源は Fig. 3 に示す周波数オフセットロック用のものと同型のものを用いた。曲線 A は積分増幅器とフィルタおよび比例増幅器を用いた場合, 曲線 B はさらに微分増幅器をも併用した場合である。Fig. 4 に示したように微分増幅器を併用し周波数帯域を拡大したので曲線 B の短期安定度は曲線 A よりも向上している。さらに同時に長期安定度も向上しており Fig. 6 の測定では τ の全範囲 ($10 \text{ ms} \leq \tau \leq 500 \text{ s}$) にわた

り曲線 B の安定度の方がすぐれていることがわかる。Fig. 6 の各曲線での σ の最小値は

Fig. 6. The square root of the Allan variance σ^2 of the frequency fluctuations of the first laser. τ and N represent the integration time and the number of data, respectively. A: The result obtained by using the proportional amplifier with the integrating amplifier and the filter in the PZT driver. B: The result obtained by using the differential amplifier with the proportional amplifier, the integrating amplifier and the filter.

曲線 A : $\sigma = 1.6 \times 10^{-14}$ ($\tau = 100 \text{ s}$ で) }
 曲線 B : $\sigma = 1.0 \times 10^{-14}$ ($\tau = 100 \text{ s}$ で) } (1)

である。以下の実験では第 1 レーザーの周波数安定化の方式としては Fig. 6 の曲線 B の場合のものを用いることにする。

次に第 2 レーザーを第 1 レーザーに対し周波数オフセットロックを施したときの結果について記す。Fig. 7 は両レーザー周波数 f_1 , f_2 の間のビート周波数 $f_1 - f_2$ の安定度を表わす Allan 分散の平方根 σ を ARPS を用いて測定した結果である。ここで $f_1 - f_2 = 4 \text{ MHz}$ に設定した。ビート周波数の変動量は $3.51 \mu\text{m He-Xe}$ レーザー周波数 (85.5 THz) で規格化したものを用いて表わしている。Fig. 6 と同様曲線 A は Fig. 3 に示す PZT 用電源中で積分増幅器とフィルタ, および比例増幅器を用いた結果であり,

Fig. 8. The experimental result in which the beat frequency $f_1 - f_2$ between the first and second lasers was automatically swept at 10k Hz interval when the second laser was frequency-offset-locked to the first laser. Therefore, the frequency of the second laser was swept at 10k-Hz interval in this figure.

と書くことができる。Fig. 6 の曲線Bと Fig. 7 の曲線B, および3)式を用いると $\tau=1$ s における σ_2 の値は $\sigma_2 \leq 1 \times 10^{-12}$ であり 2. の(1)に示した条件を満たしていることがわかる。

次に2. の(2)に示した第2 レーザーの周波数可変範囲をしらべた結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 は Fig. 1 中の周波数シンセサイザーの出力周波数を掃引回路(Frequency sweep controller)を用いて5 s ごとに10kHz ステップで掃引した結果を示し、これによるとビート周波数 $f_1 - f_2$ もそれに追従して掃引されていることがわかる。Fig. 8 でのビート周波数の可変範囲は2 MHz $\leq f_1 - f_2 \leq 20$ MHz であった。従って第2 レーザーの周波数可変範囲は18MHzであり、これは2. の(2)に示した条件を満たしている。 $f_1 - f_2 < 2$ MHz の範囲では位相比較器の利得が小さくなり制御がかかりにくい。またこの範囲で $f_1 - f_2$ を小さくしていくとビート信号検出用の検出器の窓面などからの反射により2 台のレーザー間で注入同期の現象が生じ、周波数安定度が劣化する。

$$\sigma_2^2 \cong \sigma_1^2 + \sigma_b^2 \quad (3)$$

Fig. 9. The relation between the value of σ and the value of the beat frequency $f_1 - f_2$ between the first and second lasers, where σ represents the same quantity as that shown in Fig. 7. The same PZT driver was used as for the curve B in Fig. 7. ∇ : $\tau = 1$ ms, $N = 100$, $\times$: $\tau = 10$ ms, $N = 100$, $\circ$: $\tau = 100$ ms, $N = 100$, $\bullet$: $\tau = 1$ s, $N = 100$, $\triangle$: $\tau = 10$ s, $N = 20$, ∇ : $\tau = 100$ s, $N = 10$.

る。一方 $f_1 - f_2 > 20$ MHz ではビート信号レベルが小さくなり Fig. 1 中のディスクリミネータでアナログ信号から TTL 信号への変換が不可能になるため周波数オフセットロックがかからなくなっている。従って今回の結果よりさらに周波数可変範囲をひろげるにはまずより高速の光検出器を用いビート信号を高感度増幅することが最も大切である。さて、この周波数可変範囲内でのビート周波数 $f_1 - f_2$ のそれぞれの値において $f_1 - f_2$ の安定度を測定した結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 では $f_1 - f_2$ を Fig. 8 の周波数可変範囲内のいくつかの値に設定して周波数オフセットロックを施し、そのときの $f_1 - f_2$ の安定度を $f_1 - f_2$ の設定値に対してプロットしたものでありパラメータは τ である。Fig. 9 によると Fig. 8 の周波数可変範囲内では $f_1 - f_2$ の安定

度は $f_1 - f_2$ の設定値によらないこと、従ってそれは Fig. 7 に示した結果をもって代表して表わしうることがわかる。

Fig. 10. The square root of the Allan variance σ^2 of the frequency fluctuations of the beat signal between the first and second lasers when the second laser is frequency-offset locked to the first laser. The value of σ is normalized to the He-Xe laser frequency at $3.51 \mu\text{m}$. The same PZT driver was used as for the curve B in Fig. 7. $\circ$: The frequency of the first laser only was modulated. Therefore, the beat frequency was modulated. $\bullet$: The frequency of the second laser was modulated synchronously with that of the first laser. Therefore, the beat frequency was not modulated.

次に 2. の(3)の周波数変調に関する実験の結果について記す。第1 レーザーの周波数を安定化するときには H_2CO の反転ラムくぼみの微分波形を得るためにレーザーの周波数を変調していた。^{5,6)}それは PZT に交流電圧を加えることにより行なうが Fig. 6 の結果を得たときは変調周波数 f_m は 500 Hz, 変調の最大周波数偏移 $\Delta\nu_m$ は 1.15 MHz (peak-to-peak 値) であった。この第1 レーザーを用いて第2 レーザーに周波数オフセットロックを施した実験(Figs. 7 ~ 9) では第2 レーザーは周波数変調をかけていなかった。そこで第2 レーザーの周波数に変調をかけた場合、および無変調の場合につきビート周波数 $f_1 - f_2$ の安定度を測定した結果を Fig. 10

に示す。Fig. 10ではFig. 7の曲線Bと同様PZT用電源内の積分増幅器とフィルター、比例増幅器に微分増幅器を併用している。図中白丸はFig. 7と同様第1レーザーの周波数のみを変調され、第2レーザー周波数は無変調の場合の結果を示す。すなわちこの場合ではビート周波数 $f_1 - f_2$ は変調されている。一方黒丸は第2レーザー周波数を第1レーザー周波数に同期して変調した場合の結果を示す。この場合スペクトラムアナライザのブラウン管画面上で観測されるビート信号スペクトルの幅が両レーザー周波数とも無変調の場合のビート信号スペクトルの幅と同等の値まで狭くなるように第2レーザー用のPZTに加える交流電圧の振幅と位相を調節した。白丸と黒丸の結果を比較すると両者に差異はみられず第2レーザー周波数が変調、無変調にかかわらず同等の安定度で周波数オフセットロックが可能であることがわかる。従って2. の(3)の条件が満たされていることが確認される。上記のような変調を加えた場合変調周波数 f_m の逆数に相当する積分時間 $\tau = 2 \text{ ms}$ で σ は変調の最大周波数偏移 $\Delta \nu_m$ の値に依存する値を有するはずであるから、変調、無変調の場合を比較すると $\tau = 2 \text{ ms}$ の付近での σ の値に差が生じると予想される。しかしながらFig. 10に示す実験結果でその差が現われていないのは次の理由による：周波数オフセットロックの制御系では位相比較器が使われており、これは文字どおり信号の位相を検出する回路である。位相は周波数を時間積分した量であるので位相比較器は周波数オフセットロック制御系の中で積分増幅器として働き、従ってその利得は高周波数領域では低い。すなわちこの制御系では変調周波数 f_m の値付近の周波数領域では制御利得は小さく、周波数変調により生ずる周波数変動量に対しては十分な制御がかかっていないため、変調、無変調の場合に対して $\tau = 2 \text{ ms}$ 付近では σ の値には互いに差が生じないものと考えられる。もし周波数オフセットロックの制御系の制御帯域をより高周波数領域までのばすことができればレーザーの周波数変調、無変調の場合に対し

σ の値は $\tau = 2 \text{ ms}$ 付近で互いに差を生ずるはずである。そしてこの場合は今回の結果よりもより高周波数領域まで（すなわち、より τ の小さい範囲まで）高い周波数安定度が得られると考えられる。

以上により2. の(1)～(3)で示された条件を満足する性能の周波数オフセットロックレーザーを実現することができ、当初の目標である H_2CO の高分解能分光に使用しうることが確認された。さらに高速のPZTを使い、PZT用電源の制御周波数帯域を広げることにより周波数安定度を向上させることができ、より高速の光検出器を用いることで周波数可変範囲も拡大すると期待される。

4. 結論

3.51 μm 帯での H_2CO の高分解能レーザー分光を行なうために周波数オフセットロックHe-Xeレーザーを開発した。積分、比例、微分増幅器を有するPZT用電源を用いてレーザー周波数を制御したとき次の結果を得た。

(1) 第1レーザー、すなわち周波数基準となる H_2CO 安定化He-Xeレーザーの周波数安定度は

$$\sigma = 1.0 \times 10^{-14} (\tau = 100 \text{ s}) \quad (4)$$

であった。

(2) 第1レーザー周波数に対する第2レーザーすなわち周波数オフセットロックレーザーの周波数追従度は

$$\sigma = 8.0 \times 10^{-13} \cdot \tau^{-1} \quad (10 \text{ ms} \leq \tau \leq 100 \text{ s}) \quad (5)$$

であった。

(3) 第2レーザーの周波数可変範囲は18 MHzであった。すなわち第1、第2レーザー間のビート周波数 $f_1 - f_2$ の可変範囲は

$$2 \text{ MHz} \leq f_1 - f_2 \leq 20 \text{ MHz} \quad (6)$$

であった。この範囲内で第1レーザーに対する

第2 レーザーの周波数追随度はビート周波数の値には依存しなかった。

(4) 第1 レーザーに対する第2 レーザーの周波数追随度の値は周波数変調の影響を受けなかった。

謝 辞

実験に協力いただいた本学大学院修士課程小山亮平氏（現在旭化成株式会社）葛城誠一氏（現在東京芝浦電気株式会社）に感謝します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費特定研究の補助により行なわれたものである。

参 考 文 献

- 1) R.L.Barger and J.L.Hall: Phys. Rev.Letters **22** (1969) 4.
- 2) G.R.Hanes and K.M.Baird: Metrologia **5** (1969) 32.
- 3) C.Freed and A. Javan: Appl.phys.Letters **17** (1970) 53.
- 4) D.W.Allan: Proc.IEEE **54** (1966) 2.
- 5) M.Ohtsu, R.Koyama and T.Tako: Jpn.J.Appl. **18** (1979) 1621.
- 6) M.Ohtsu, S.Katsuragi and T. Tako: submitted to IEEE J. Quantum Electron.
- 7) 椎尾一郎, 大津元一, 田幸敏治: 電子通信学会論文誌Cに投稿中
- 8) M.Ohtsu, R.Koyama, A.Kusnowo and T. Tako: Jpn.J.Appl.phys.**18** (1979) 1619.