

解説

位相安定レーザーの実現

盛永篤郎

計量研究所 〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

(1987年5月8日受理)

Realization of Phase Stable Laser

Atsuo MORINAGA

National Research Laboratory of Metrology,
1-1-4, Umezono, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305

1. はじめに

昨年の第14回量子エレクトロニクス国際会議でNBSのHallは「位相安定レーザー」と題した招待講演を行った¹⁾。2台のHe-Neレーザーはビート線幅100 mHz以下、積算時間1~300 sのアラン分散値 3×10^{-16} 、位相安定度1 radドリフト/10 sで安定化されたという。まさに可視レーザー光の周波数ゆらぎが1 Hz以下に、すなわち、2台のレーザーのビート信号の位相が検出できる時代がきたことを示している。

レーザーは誕生当初からコヒーレンスの良さが特色とされていた。コヒーレンスの限界は量子雑音によって制限され、普通のHe-Neレーザーでそれによる周波数ゆらぎ幅は10 mHz程度と小さな値になる。しかし、実際にははるかに大きな熱雑音によりゆらいでいる。過去に2台のHe-Neレーザーを機械的・温度的・音響的に静かな環境の中に置き、ビート周波数の短期変動が20 Hz以下にまで小さくした報告がある²⁾。しかし、普通はこの値の 10^4 倍程度である。分光光源として重要な色素レーザーはジェット表面変動に起因する高周波雑音、アルゴンイオンレーザーでは放電プラズマに起因する雑音などそれぞれに固有の周波数雑音もある。このような周波数変動は別の安定な周波数基準と比較し、誤差信号により共振器長を制御してとり除く。すなわち、周波数を安定化する。現在、波長基準としてヨウ素分子などの吸収線を基準に安定化された可視レーザーがある。これらのレーザーの安定度はアラン分散値で 10^{-12} 程度、絶対値の精度は 10^{-11} (5 kHz)程度に限られている³⁾。

レーザーの周波数ゆらぎ幅を1 Hz以下にまで小さくすることができたのは、最近のFM側帯波法(光ヘテロダイン法とも呼ばれる)による周波数安定化技術の発展によるところが大きい。このFM側帯波法の原理はマイクロ波の安定化やNMRの研究で使われていたが、光領域で使われたのは1981年にBjorklundとLevensonにより高感度分光法として用いられたのが最初である⁴⁾。ほぼ同時に、Dreverらにより可変波長レーザーを高フィネスファブリー・ペローを基準に周波数安定化する技術として開発された⁵⁾。この方法はレーザー周波数の変動を検出信号のショット雑音レベルにまで小さくできる優れた方法である。FM側帯波法を使って周波数安定化された色素レーザーは超高分解能分光⁶⁾や将来の光領域周波数標準の実現への研究⁷⁾に応用されている。また、同様のAr⁺レーザーは重力波の検出装置として研究されている⁸⁾。

FM側帯波法についてはこれまで初期の成果を紹介した解説があるにすぎない⁹⁾。そこで、本解説では原理と特徴を簡単に要約し、それを応用した位相安定レーザーの実現をめざす先端的研究の成果と現状について紹介したい。

2. FM側帯波法の原理と特徴

Bjorklundら⁴⁾やHallら¹⁰⁾により高感度分光法として登場したFM側帯波法の原理や特徴はすでに詳説されている¹¹⁻¹³⁾。本章ではそれらについて要約する。

FM側帯波法を用いた分光法を図1に示す。周波数 ν のレーザー光は位相変調器により周波数 f で位相変調

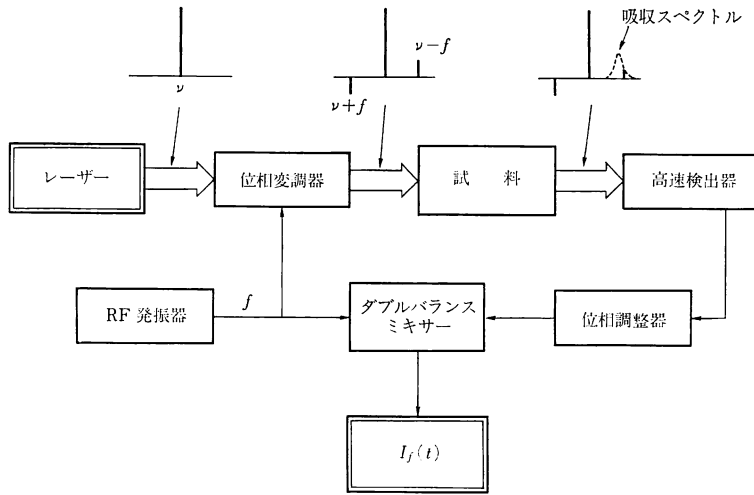


図 1 FM 側帯波法を用いた高感度分光

される。変調指数を M とすると、変調器を出た光の電場は

$$E(t) = E_0 \sin(2\pi\nu t + M \sin 2\pi f t) \\ \cong E_0 [-(M/2) \sin \{2\pi(\nu - f)t\} + \sin(2\pi\nu t) \\ + (M/2) \sin \{2\pi(\nu + f)t\}] \quad (1)$$

となり、搬送波に周波数 $\nu \pm f$ の側帯波が生ずる。ここで、 $M \ll 1$ とし、高調波成分は省略した。この光が鋭い吸収特性をもつ試料に入り、振幅や位相に変化を受ける。その変化を

$$T_j = \exp(-\delta_j - i\phi_j) \quad (2)$$

とする。ここで、 $j=0, \pm 1$ は $\nu, \nu \pm f$ の成分を示す。試料を透過した光は高速のフォトダイオードで受光される。フォトダイオードに生ずる光電流 $I(t) = (c/8\pi)(E(t))^2$ は、 $M^2, |\delta_0 - \delta_{-1}|, |\delta_0 - \delta_1|, |\phi_0 - \phi_1|, |\phi_0 - \phi_{-1}| \ll 1$ として近似すると、

$$I(t) = (cE_0^2/8\pi) \exp^{-2\delta_0} \{ 1 + (\delta_{-1} - \delta_1)M \cos 2\pi f t \\ + (\phi_1 + \phi_{-1} - 2\phi_0)M \sin 2\pi f t \} \quad (3)$$

になる。この式から $\cos 2\pi f t$ の成分は二つの側帯波が受ける吸収振幅の差に、 $\sin 2\pi f t$ の成分は側帯波と搬送波の位相差の平均に比例することがわかる。変調周波数が吸収線の半値半幅 Γ より小さい場合は、 $\cos 2\pi f t$ の成分は吸収の微分に、 $\sin 2\pi f t$ の成分は分散の 2 次微分に比例することになる。これはこれまでの低周波数変調の方法に相当する。一方、 $f \gg \Gamma$ の場合は、二つの側帯波と搬送波のうち吸収線に一致したものだけが変化を受けることになる。したがって、 $\cos 2\pi f t$ の成分は吸収曲線の形に、 $\sin 2\pi f t$ の成分は分散曲線の形になる。吸収がローレンツ型と仮定し、 $f/\Gamma = 20$ に対して計算された

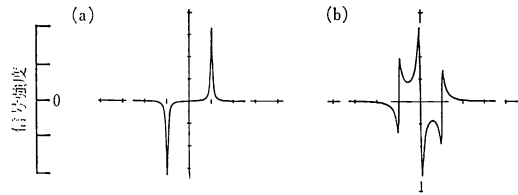


図 2 FM 側帯波法の信号¹¹⁾
 $f/\Gamma = 20$, 横軸は 1 目 f .
位相: (a) 0° , (b) 90°

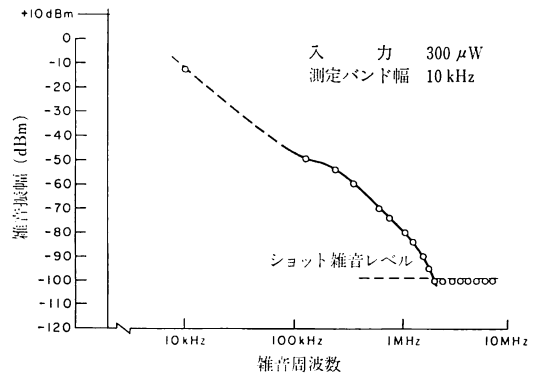


図 3 色素レーザーの振幅特性¹²⁾

結果を図 2 に示す¹¹⁾。

低周波変調の場合、信号中の雑音は主にレーザーの振幅雑音による。図 3 に色素レーザーの振幅雑音の一例を示す。レーザーの振幅雑音は高周波で小さくなり、2 MHz 以上では検出器のショット雑音レベルに達する¹²⁾。1 kHz の低周波数での振幅雑音はショット雑音の 80 dB 以上も大きい。したがって、高感度検出のためには数 MHz 以上の FM 側帯波を使うのが有効である。

検出器がフォトダイオードの場合で考える。フォトダイオードで $\cos 2\pi ft$ により生ずる電流のパワーは、 $\Delta\delta$ を吸収の変分化とすると、

$$\overline{i_s^2} = (1/2)g^2e^2\eta^2(P/h\nu)^2\Delta\delta^2M^2 \quad (4)$$

で与えられる¹¹⁾。ここで、 g 、 η はフォトダイオードの利得と量子効率、 e は電荷、 P は入射レーザーパワー、 $h\nu$ は光子エネルギーである。一方、検出器で生ずるショット雑音のパワーは

$$\overline{i_N^2} = 2g^2e^2\eta(P/h\nu)B \quad (5)$$

で与えられる。そこで、 B は等価雑音帯域幅である。したがって、SN 比 (S/N) は

$$S/N = \overline{i_s^2}/\overline{i_N^2} = \eta P \Delta\delta^2 M^2 / 4h\nu B \quad (6)$$

になる。これから最小検出量 $\Delta\delta_{\min}$ を S/N が1のときの大きさと定義すると、

$$\Delta\delta_{\min} = 2(h\nu B / \eta M^2 P)^{1/2} \quad (7)$$

が得られる。たとえば、 $\eta=1$ 、 $P=5\text{ mW}$ 、 $\nu=5\times 10^{14}\text{ Hz}$ 、 $M=0.1$ とすると、 $B=1\text{ Hz}$ に対し、 $\Delta\delta_{\min}=1.5\times 10^{-7}$ 、 $B=1\text{ MHz}$ に対し、 $\Delta\delta_{\min}=1.5\times 10^{-4}$ になる。以上のように FM 側帯波法を使うことにより、高感度かつ高速の信号検出が可能である。

3. FM 側帯波法による周波数安定化

3.1 高フィネス基準共振器への定安定化

FM 側帯波法が使われる以前に、Helmcke らは高フィネスファブリー・ペロー共振器を基準共振器に使い透過曲線の傾斜の中央に安定化する方法を調べた¹⁴⁾。かれらは色素レーザーの線幅を 1 kHz にまで狭くすることができたが、共振器の中で光場が蓄積される時間、すなわち、共振曲線の幅 (FMHM) $\delta\nu_c$ により制御帯域幅 B が制限されるということを描した。このため広い帯域

幅で制御するには共振線幅の広いものを使う必要があり、緩い傾斜はショット雑音を大きくするので狭いレーザー線幅を得ることはできない。ショット雑音により制限されるレーザー線幅 $\delta\nu$ は次式で与えられる。

$$\delta\nu = \delta\nu_c (h\nu B / PT\eta)^{1/2} \quad (8)$$

ここで、 P は共振器への入射パワー、 T は共振時の最大透過率である。たとえば、 $\delta\nu_c=1\text{ MHz}$ 、 $P=0.15\text{ mW}$ 、 $T=0.2$ 、 $\eta=1$ 、 $\nu=5\times 10^{14}\text{ Hz}$ 、 $B=1\text{ MHz}$ とすると $\delta\nu$ は 100 Hz になる。この式は同一制御帯域幅のとき、共振線幅の狭いほどレーザー線幅を狭くすることができることを示している。

FM 側帯波法は共振器の透過曲線の頂点にレーザー周波数を安定化する方法である。しかも、共振器からの反射光を使うことにより、共振器の蓄積時間より速い変化に対しては位相比較による制御を行なう。そのため、制御帯域幅を共振線幅より広くすることができる。先の例で $\delta\nu_c=10\text{ kHz}$ にすることでレーザー線幅 1 Hz が得られる。

FM 側帯波を用いた安定化法 (Pound-Drever 法) を図 4 に示す。レーザー光は位相変調器を透過し側帯波を伴い、偏光ビームスプリッター、 $\lambda/4$ 波長板 (あるいは 45° フェラデーローテータ) を透過し共振器に入射する。共振器からの反射光は $\lambda/4$ 板を通り直交偏光になり偏光ビームスプリッターで入射光と分離され検出される。この場合、側帯波周波数と同相成分を検出すると図 2 (b) の分散形が得られる。したがって、この曲線を周波数弁別に使うと、共振曲線の中心に周波数安定化できる。また反射光は共振器の入射鏡からの直接反射による場と共振器内で蓄積された場からの漏れとから合成される。蓄積時間より短い時間に周波数変化が生じた場

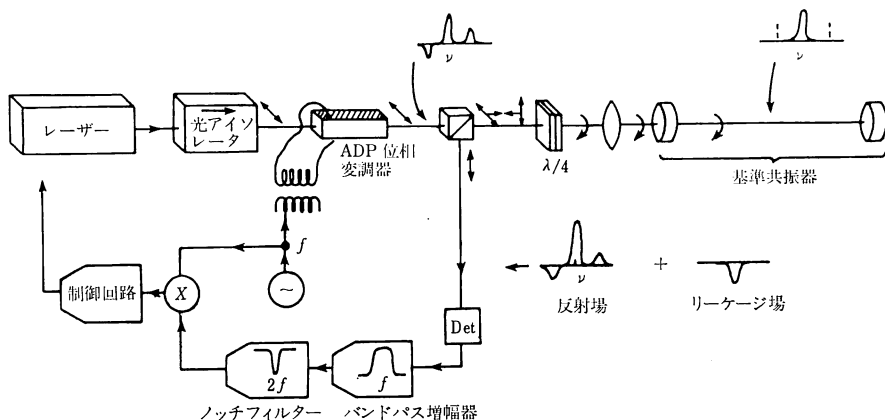


図 4 FM 側帯波法によるレーザー周波数安定化⁵⁾

合は、変化した直接反射光の位相はそれまでの光場の平均である蓄積光の位相と比較されることになる。したがって、この位相差が検出され瞬間的な周波数変化に対する制御が行なわれる。これが FM 側帯波法を用いた周波数安定化法の大きな特色である。

FM 側帯波法を用いた場合の他の特色として制御信号の形がある。分散形の場合、レーザーの離調周波数が $\delta\nu_c/2$ から側帯波周波数 f までは同じ符号の信号を維持している。これは FM 側帯波法を用いた制御が $\nu \pm f$ の広い制御の窓をもっていることを意味し、レーザーの安定化を開始するうえに重要な特性になる。すなわち、通常の場合のように、フリーランニング状態のレーザーの周波数を共振線幅内に同調する必要がなく、共振周波数から $\pm f$ の範囲にあれば安定化できる。色素レーザーのように変動の大きいレーザーを狭い共振線幅の基準共振器に安定化する場合にとくに有効である。

Drever らの最初の実験は He-Ne レーザーと色素レーザーを同一の基準共振器に安定化しビート信号を検出することで本方式の性能を評価することを目的として行なわれた⁵⁾。He-Ne レーザーと色素レーザーにはそれぞれ 4.6 MHz, 40 MHz の側帯波がたてられた。基準共振器は FSR 100 MHz, 共振線幅 300 kHz のものが使われ、1 次数異なる共振周波数に 2 台のレーザーが安定化された。両方のレーザーとも位相変調器を内蔵し、制御帯域幅は He-Ne レーザーで 50 kHz, 色素レーザーで 3 MHz (共振線幅の 10 倍) であった。100 MHz のビート周波数は 750 Hz にヘテロダインされ、波形観測の結果、ビートのゆらぎは 750 Hz 以下であった。さらにフーリエ解析や位相の変動測定がなされ線幅が 100 Hz 以下であることが示された。

3.2 高安定基準共振器

3.1 項の例では 2 台のレーザーは同一の共振器に安定化されたが、Hough らは 2 台の色素レーザーを別々の基準共振器に安定化しビート信号を測定することにより

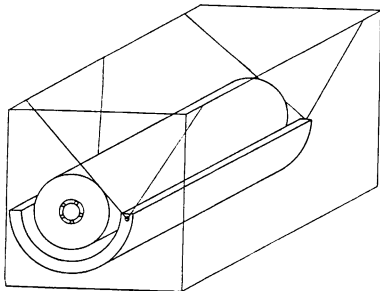


図 5 5 本吊り基準共振器の構造¹⁵⁾

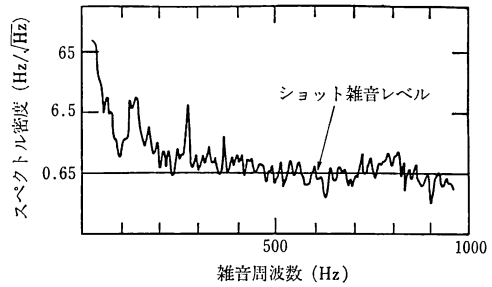


図 6 制御状態の周波数雑音¹⁵⁾

本方式を評価した¹⁵⁾。かれらは片方の基準共振器に特別の振動を防ぐ工夫をした。構造を図 5 に示す。低膨張ガラスゼロデュールで作った FSR 300 MHz, 共振線幅 400 kHz の基準共振器は光の進行方向にのみ自由度を残すように真空容器中に 5 本のスチール線で吊るされた。容器は種々の音響や振動の吸収材を使って防振台上におかれた。また、高精度の温度制御が行なわれたり、変動時間を緩和するために容量の大きな断熱シールド材が用いられた。もう片方の共振器は熔融石英製で、FSR 550 MHz, 共振線幅 1 MHz のものが使われた。両共振器とも鏡の一枚は同調用電歪素子を介して円筒につけられた。

ビート周波数がフーリエ解析された結果、吊下げ型の工夫の有効性は確認された。しかし、まだ、200 Hz 以下の周波数の機械的振動が残っていた。200 Hz から 1 kHz の範囲では、図 6 に示すように、2, 3 の固有振動を除けばショット雑音レベルにまで安定化された。これらの結果から、1~100 ms の積算時間に対してアラン分散は $<5 \times 10^{-13}$ となり、短期のレーザー発振線幅は 750 Hz と見積られた。機械的振動は電歪素子がひろうのではないかと推定している。一方、この実験では毎秒 720 Hz の周波数ドリフトが観測された。これは測定中の真空容器内のアウトガスが原因とされた。そのため、定常的に真空排気することが必要である。

性能限界を与える要因として光のフィードバックによるドリフトを挙げている。その他、共振器への入射角度変動、レーザー光強度のゆらぎ、FM 側帯波法の欠点である AM 変調の発生、高速制御回路のドリフトが議論されている。結論として、低周波数での雑音が除去できれば 1 Hz 程度のレーザー線幅も実現できると推定している。

3.3 受動共振器を基準にしたスペクトロメータ

Helmcke らは同調用の電歪素子がない“受動”基準共振器を使ったレーザースペクトロメータを開発し

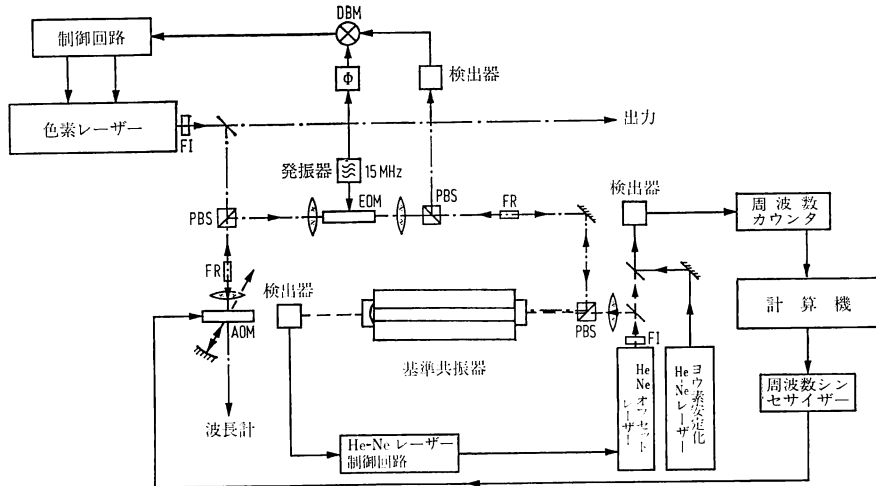


図7 受動共振器を用いた色素レーザースペクトロメータ¹⁶⁾

た¹⁶⁾。とはいっても基準共振器は経年変化等によりわずかながら共振周波数が変化する。そこでその変化量を読みとり音響光学変調器を使ってレーザー周波数の補正を行なっている。装置を図7に示す。基準共振器の構成はHoughら¹⁵⁾とほぼ同様であるが、あらかじめガス出しをして常時イオンポンプで 10^{-6} Torrに排気された。共振器は鏡が光学接着されたゼロジュール製で、FSR 250 MHz、共振線幅 700 kHzである。共振器の共振周波数の変化はオフセットロックレーザーを介してヨウ素安定化 He-Ne レーザーとの比較で測定された。共振周波数は製作当初1日数 MHz 変化したが、100日目以降、毎秒 2 Hz の割に小さくなり、共振器長としては縮んでいる。

色素レーザーの出力の一部は音響光学変調器で周波数シフトされた後、基準共振器の特定の共振周波数に安定化される。このとき周波数シフト量 ν_s は

$$\nu_d - (\lambda_H/\lambda_d)\nu_H = (\lambda_H/\lambda_d)\nu_b - \nu_s \quad (9)$$

で与えられる。ここで、 ν_d 、 ν_H 、 ν_b は色素、ヨウ素安定化 He-Ne レーザーおよびビートの周波数、 λ_H/λ_d は波長比である。左辺は一定であるので、一度この値が決まれば、 ν_b を測定することにより ν_s が求まり、常に色素レーザーを特定周波数 ν_d に同調することができる。約3カ月にわたって色素レーザーを Ca 原子の 657 nm 遷移のラムゼーフリンジの中心周波数に同調した結果を図8に示す。この間、基準共振器の共振周波数は 30 MHz も変化しているのに、色素レーザーの周波数は実に ± 10 kHz 以内で一致している。この変動の原因は比較に使っているヨウ素安定化 He-Ne レーザーの再現性の限界にあると考えられる。この装置を使い Helmcke

と Morinaga は 6 kHz 幅のラムゼーフリンジの検出を行なった⁷⁾。

3.4 DFM 側帯波法と光-マイクロ波結合

レーザー周波数に2重の側帯波 (DFM) をたさせ、基準共振器を介して光周波数とマイクロ波周波数を直接結ぶ方法が DoVoe と Brewer によって提案された¹⁷⁾。これは周波数チェーンによる可視周波数測定法¹⁸⁾と比較できる方法としても興味がある。

実験装置図を図9に示す。レーザー光は LiTaO₃ の電気光学結晶を使い共振器の FSR に等しい周波数の側帯波 f_1 がたてられる。次に ADP を使って側帯波 f_2 がたてられる。基準共振器からの反射信号を検出すると、 f_2 の周波数成分はこれまでのようにレーザー周波数の共振周波数からのずれに比例する。また、 $f_1 \pm f_2$ の成分はレーザー周波数の変動によらずに、共振器 FSR の f_1 からのずれをあらわす。したがって、この二つの信号を使うことにより、共振器を f_1 に、レーザーを共振器に独立に安定化できる。

実験では $f_1 = 298$ MHz、 $f_2 = 19.4$ MHz が用いられている。基準共振器には実にフィネス 2000 のものが使われた。この結果、色素レーザーは 300 Hz rms の精度で共振器に安定化できた。一方基準共振器は 1×10^{-10} /日の安定度の rf 周波数に 0.1 s の積算時間で 60 mHz rms の値で安定化された。これはショット雑音からの計算値 7.5 mHz の 10 倍以内の値である。光周波数を直接 rf 周波数から決定するには、共振器の鏡の回折による位相シフト量が問題となるが、実験装置の改良を行えば 10^{-10} ~ 10^{-11} の精度での周波数決定が可能としている。事実、続報ではこの方式でヨウ素安定化 He-Ne

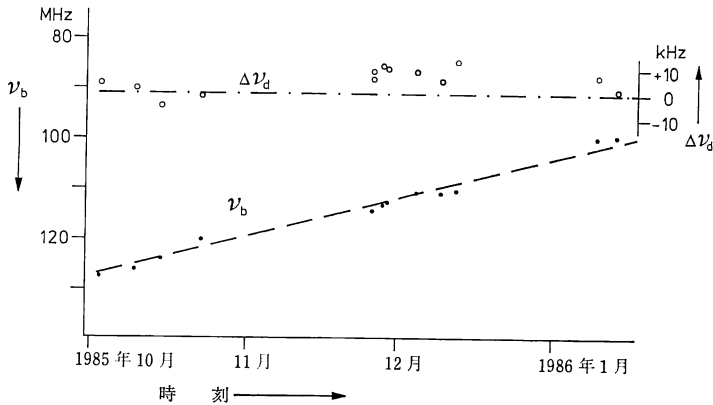


図 8 Helmhcke らの色素レーザースペクトロメータの長期再現性¹⁶⁾

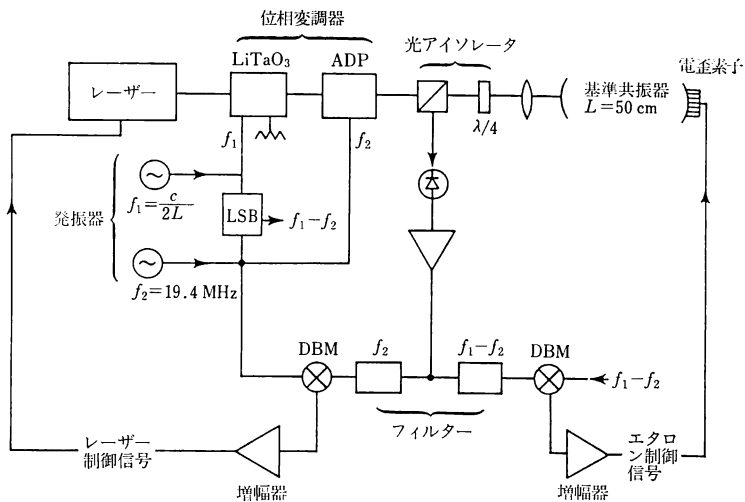


図 9 DFM 側帯波分光法を用いたレーザーと RF 周波数の結合¹⁷⁾

レーザーの周波数を予備測定した結果は周波数チェーン法による値と 10 MHz の範囲で一致したことを報告している¹⁹⁾。

4. おわりに

このほか、重力波検出の目的で Glasgow 大学のグループによる Ar⁺ レーザーの FM 側帯波法による安定化の研究がある⁶⁾。かれらは電歪素子のみでは雑音周波数 1 kHz の雑音 0.06 Hz/√Hz を外部位相変調器を用い 2 MHz までの広帯域制御により 0.01 Hz/√Hz まで下げることができたと報告している。

以上、FM 側帯波法を用いたレーザー周波数安定化の方法と特徴、および、いくつかの先端的研究について紹介した。FM 側帯波法によるレーザー周波数安定化は原理的にショット雑音レベルまでレーザー線幅を狭めるこ

とができる方法で、1 Hz 以下の線幅を得ることも可能である。こうして誕生する位相安定レーザーはその優れたコヒーレンス性のために超精密計測への応用のみならず、光通信などの産業界のニーズにも貢献するものと思われる。

文 献

- 1) J.L. Hall: "Phase stable laser," *Proceedings of the International Conference on Quantum Electronics*, San Francisco(1986), J. Opt. Soc. Am. B, 3, Suppl.(1986) pp. 80-81.
- 2) T.S. Jaseja, A. Javan and C.H. Townes: "Frequency stability of He-Ne lasers and measurements of length," *Phys. Rev. Lett.*, 10 (1963) 165-167.
- 3) "Documents concerning the new definition of the metre," *Metrologia*, 19 (1984) 163-178.
- 4) G.C. Bjorklund and M.D. Levenson: "Sub-Doppler frequency-modulation spectroscopy of I₂," *Phys.*

- Rev. A, **24** (1981) 166-169.
- 5) R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley and H. Ward: "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator," *Appl. Phys. B*, **31** (1983) 97-105.
 - 6) L. Hollberg and J. L. Hall: "Observation of energy level shifts of Rydberg atoms due to thermal fields," *Laser Spectroscopy VI*, ed. H. P. Weber and W. Lüthy (Springer-Verlag, Berlin, 1983) pp. 229-232.
 - 7) J. Helmcke and A. Morinaga: "Optical frequency standard based on Ramsey excitation in a Ca atomic beam," *Digest of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements* (NBS, 1986) pp. 123-124.
 - 8) G. A. Kerr, N. A. Robertson, J. Hough and C. N. Man: "The fast frequency stabilisation of an argon laser to an optical resonator using an extra-cavity electro-optic modulator," *Appl. Phys. B*, **37** (1985) 11-16.
 - 9) 大津元一, 田幸敏治: "レーザー周波数安定度, 再現性向上のための分光的手法", *分光研究*, **32** (1983) 305-317.
 - 10) J. L. Hall, L. Hollberg, T. Baer and H. G. Robinson: "Optical heterodyne saturation spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, **39** (1981) 680-682.
 - 11) G. C. Bjorklund, M. D. Levenson, W. Lenth and C. Ortiz: "Frequency modulation spectroscopy," *Appl. Phys. B*, **32** (1983) 145-152.
 - 12) J. L. Hall, L. Hollberg, Ma Long-sheng, T. Baer and H. G. Robinson: "Progress toward phase-stable optical frequency standards," *J. Phys.-Colloq.*, **42**, Suppl. 12 (1981) C8-59-71.
 - 13) A. Schenzel, R. G. DeVoe and R. G. Brewer: "Phase-modulation laser spectroscopy," *Phys. Rev. A*, **25** (1982) 2606-2621.
 - 14) J. Helmcke, S. A. Lee and J. L. Hall: "Dye laser spectrometer for ultrahigh spectral resolution: design and performance," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 1686-1694.
 - 15) J. Hough, D. Hils, M. D. Rayman, Ma L.-S., L. Hollberg and J. L. Hall: "Dye-laser frequency stabilization using optical resonators," *Appl. Phys. B*, **33** (1984) 179-185.
 - 16) J. Helmcke, J. J. Snyder, A. Morinaga, F. Mensing and M. Gläser: "New ultra-high resolution dye laser spectrometer utilizing a nontunable reference resonator," *Appl. Phys. B*, **43** (1987) 85-91.
 - 17) R. G. DeVoe and R. G. Brewer: "Laser frequency division and stabilization," *Phys. Rev. A*, **30** (1984) 2827-2829.
 - 18) D. A. Jennings, C. R. Pollack, F. R. Petersen, R. E. Drullinger, K. M. Evenson, J. S. Wells, J. L. Hall and H. D. Layer: "Direct frequency measurement of the I₂-stabilized He-Ne 473 THz laser," *Opt. Lett.*, **8** (1983) 136-138.
 - 19) R. G. DeVoe, C. Fabre, K. Jungmann, K. L. Foster and R. G. Brewer: "Progress in interferometric laser frequency division," *Proceedings of the International Conference on Quantum Electronics*, San Francisco (1986), *J. Opt. Soc. Am. B*, **3**, Suppl. (1986) pp. 80-81.