

解説

レーザー周波数の絶対測定

作間 英一・黒沢 富蔵・三木 幸信・大苗 敦

計量研究所 〒305 つくば市梅園 1-1-4

(1989年5月22日受理)

Absolute Frequency Measurements of Lasers

Eiichi SAKUMA, Tomizo KUROSAWA, Yukinobu MIKI and Atsushi ONAE

National Research Laboratory of Metrology, 1-1-4, Umezono, Tsukuba 305

1. はじめに

レーザーおよびその応用技術の発展はめざましく、現在広範囲の計測分野で利用されている。これはレーザーの安定化技術の進歩により、コヒーレントかつ高輝度な光源が比較的容易に得られるようになったことが大きい。この進歩は電磁波の持つ周波数という量を従来より高い光領域でも測定することを可能にしてくれた。

周波数の一次標準の実現精度は他の物理標準より高く、また長さ、温度などと密接な関係がある。したがって周波数の測定によってこれらの物理標準の実現精度が向上すること、さらにこれら標準の統一が可能となることなどの発展が考えられる。周波数を介した精密測定を光領域に拡張するためには、レーザー周波数の絶対測定、すなわち現在の周波数標準である Cs 標準周波数 (約 9 GHz) を基準とした測定が必要となる。

本解説では、レーザー周波数絶対測定の歴史およびその測定法について簡単に述べ、計量研究所の研究を中心に現状について述べる。

2. 周波数測定の歴史¹⁾

レーザー光の周波数測定の動きはすでにレーザーが発明された直後に始まっている。当時の大きな動機は、光速度の値の精度向上であった。もし特定のレーザー線の波長と周波数を精密に測定できれば、それらを掛けあわせることで光速度の値が得られるからである。測定された光速度の値は、従来より2桁も精度が向上することが明らかになり、おもに各国の標準研究所で、真空波長と

周波数の絶対測定が行なわれた。その結果、1973年「メートルの定義のための諮問委員会」で新しい光速度の値が勧告された²⁾。

その後、種々のレーザー線の周波数と真空波長の絶対測定が行なわれた結果、測定精度が当時の波長標準 (Kr ランプの特定の波長) の精度 4×10^{-9} より良いことが確認され、光速度の値に基づく新しい“メートル”が定義されることになった (1983年第17回度量衡総会³⁾)。

また同時に定義の実現の方法として、(1) $l=c \cdot t$ の関係を用いる方法、(2) 絶対周波数 f の平面電磁波の真空中の波長を $\lambda=c/f$ より求める方法、(3) 別に推奨する5種類の放射光を光源として用いる方法、が勧告された。ここで c =光速度の値、 t は測定時間である。表1, 2に周波数の絶対測定されたおもなレーザー線をまとめた。

3. 光周波数の測定法

光領域の周波数は数 THz 以上で、これを直接観測できる装置は現在ない。そのためビートダウン方式で、測定可能な周波数まで落したり、標準マイクロ波周波数の整数倍と結びつける等の方法がとられる。いままでに使われたもの、提案されたものをまとめると、(イ)エタロンを利用する方法、(ロ)分周方式、(ハ)通信(ビートダウン)方式があげられる。

(イ)の方式は、Bay ら⁴⁾によって提案され、その後 DeVoe ら⁵⁾により改良された。いま周波数 f のレーザー光をエタロンのモード間隔に等しい周波数 σ で変調すると、二つの側帯波 $f \pm \sigma$ が生じる。両側帯波を高

表1 周波数が絶対測定されているおもなレーザー線

レーザー媒質	波長	備考
HCN	337 μm	
H ₂ O	28, 78 μm	
CH ₃ OH	118 μm	
	70 μm	
CO ₂	9~10 μm	同位体分子も含む
CO	4~5 μm	
Color center	2.03 μm	
He-Xe	2.03 μm	
He-Ne	3.39 $\mu\text{m}^{\text{a)}$	周波数値は表2参照
	1.15 μm	
	633 nm ^{a)}	473 612 214.8 kHz ^{b)}
	612 nm ^{a)}	489 880 355.1 kHz ^{b)}
色素レーザー	576 nm ^{a)}	520 206 808.51 kHz ^{b)}
Ar イオンレーザー	515 nm ^{a)}	582 490 603.6 kHz ^{b)}

^{a)} 1983年推奨された光周波数標準, ^{b)} 安定化の基準にヨウ素分子の吸収線を使った。

表2 最近のメタンガス安定化 He-Ne 3.39 μm の測定 (1980年以降)

年	研究所	$\nu-88\,376\,181\,000$ (kHz)	分散値 (kHz)	文献
1980	LPTF (仏)	618	14	1)
1980	NPL (英)	616	3	1)
1981	ITP (ソ)	603	3.0	1)
1981	LPTF (仏)	612	11	1)
1981	VNIIFTRI (ソ)	603.4	1.4	1)
1983	RECOMMEND	608	3.9	1)
1983	ITP (ソ)	602.9	1.2	1)
1985	LPTF (仏)	600.0	3.4	11)
1985	PTB (独)	603.4	7.0	13)
1988	NRC (加)	599.07	0.07	22)
1988	PTB (独)	599.7 ^{a)}	1.0	14)

^{a)} 安定化の基準にラムゼーフリッジを利用, 他はメタンの吸収線を使う。

フィネスのエタロンにいれ, 同時に共鳴させると,

$$f = n\sigma = (N^+ + N^-) / (N^+ - N^-) \cdot \sigma \quad (1)$$

の関係が得られる。ここに N^+ , N^- は, 側帯波 $f + \sigma$, $f - \sigma$ に対する干渉次数を表わす。 σ を標準周波数とし, n を求めれば f の絶対周波数が決まる。 n を求めるには鏡面での反射に伴う位相の飛びを補償するため異なる二つの長さのエタロンに対して測定する必要がある。 DeVoe らは, より精度の高い測定ができるよう, レーザー周波数を二つの周波数で位相変調した。すなわちレーザー周波数を $\omega_1 (= c/2L)$, $\omega_2 (= \text{数 MHz})$ で位相変調した後, エタロンを通過させる。エタロンを出た光のうち, ω_2 , $\omega_1 - \omega_2$ の周波数成分を別々に検出する。そこで $\omega_1 - \omega_2$ の成分をゼロになるようにエタロン長を

制御すると, エタロンのモード間隔 $\sigma = \omega_1$ が成立する。また, 同時に ω_2 の成分がゼロになるようにレーザーの発振線を制御すると, $f = n\sigma = n\omega_1$ が成立する。 ω として標準マイクロ波周波数を用いれば, 絶対周波数が求まるし, レーザー周波数を基準にマイクロ波を制御すれば, $1/n$ に分周することも可能である。制御に使う信号は, エタロンから出てくる光と, 入射側の鏡面で反射する光を混ぜることによって得ている。この方式は, 高フィネスのエタロンが作りやすい可視領域の測定に有効である。

(ロ)の方式は提案の段階で⁶⁾, 実際の測定はまだ行なわれていないが, 磁場に閉じ込められた電子のサイクロトロン共鳴を利用する。レーザー光を電子の円運動の接

線方向に偏光させておき、円軌道の一点で電子を加速する。電子はレーザー光からエネルギーを得るが、それは円運動中に放射となって失われる。レーザー周波数とサイクロトロン周波数は、エネルギーのやりとりを通して位相ロックされるため、サイクロトロン放射の周波数を測れば相互作用する周波数を測定することができる。たとえば電子のサイクロトロン周波数をレーザー周波数の $1/k$ 倍にしておけば、サイクロトロン運動によって放射される光の周波数は f/k に分割される。この方式を実現するためには非常に小さな直径のサイクロトロンが必要であるが、ペニングトラップに閉じ込めた電子を利用する方法が提案されている。これは最近のイオン閉込め技術の進歩によって、実現の可能性が出てきた⁷⁾。波長の長いほうがトラップ製作条件がゆるくなるため、CO₂ レーザーの周波数の測定が提案されている。

(ハ)の方式は周波数チェーンを使う。MITの Javan, NIST(旧 NBS)の Evenson らが発展させ、現在他の方法より測定精度が良く、各国の標準研究所で使われている。以下では周波数チェーン方式について計量研究所での研究を中心に述べる。

4. 周波数チェーンによる周波数の絶対測定

この方式は、周波数未知のレーザー光を、周波数既知のレーザー光とマイクロ波を用いて合成し、その周波数の差、すなわちビート周波数をカウンター等で測定するものである。その原理を式で表わすと

$$f_0 = lf_i \pm mf_m \pm nf_n \pm f_B \quad (2)$$

となる。ここに f_0 は測定したいレーザー周波数、 f_i , f_m は周波数既知のレーザー周波数、 f_n はマイクロ波周波数である。 f_B はビート周波数で、スペクトル分析器やカウンターで測定できる周波数範囲になるように他の周波数を選ぶ。 l, m, n は整数で、照射レーザー光、マイクロ波によって非線形(通倍・混合)素子の中で誘導、生成される高周波電流の通倍数を表わす。いったん正確な値のわかったレーザー周波数 f_0 は次のより高いレーザー周波数測定のための基準として使われる。一連のレーザー光源、マイクロ波源、そしてビートダウンするための通倍・混合素子の組合せを周波数チェーンと呼ぶ。いままで使われたチェーンは文献 1) にまとめられている。

周波数チェーンが働くためには、レーザー光源、マイクロ波源の出力が単一モードで 20~40 mW 以上あること、通倍・混合素子が希望の周波数領域で希望の通倍能力をもつこと、などが必要となる。

5. 計量研の現状

計量研究所では、図 1 のチェーンを使って、メタン安定化 He-Ne レーザー 3.39 μm 線の周波数の絶対測定を進めてきた。その段階で上述の条件を満たすため高出力アルコールレーザー、高出力 He-Ne レーザー、ジョゼフソン素子、W-Ni 素子を開発してきた。以下にこれらについて説明する。

5.1 レーザー装置

5.1.1 高出力光励起アルコール(CH₃OH)レーザー装置

光励起アルコールレーザーの 70.5 μm 線は、この波長近辺で 118.8 μm , 96.5 μm について高い出力が得られるが、単一モードで 40 mW 以上の出力を得るために、以下に述べるような装置を製作した。

アルコールレーザー装置は、励起用 CO₂ レーザー装置と、アルコールレーザー共振器とからなる。励起用 CO₂ レーザーには、全長 2.2 m の共振器を用いた。放電管にはパイレックスガラスの二重管を用い、外側を冷却に、内側を放電に使う。放電部は内径 10 mm、長さ約 2 m とし、中央にカソード、両端にアノードをつけた。出力鏡としては、反射率 70% の ZnSe を使った。発振線の選択には 150 本/mm の回折格子を用い、波長 9.7 μm (9 P (34)) で発振させた。ガスフロータイプとし、圧力比 CO₂: N₂: He = 16: 16: 68 の混合ガスを用いたが、内部圧力 2.6~3.0 kPa、放電電流 45 mA のときに最大出力 45 W が得られた。CO₂ レーザーの出力曲線の全幅は 70 MHz あり、その両端では多モードになりやすかった。

アルコールレーザー共振器を図 2 (a) に示す。全長 1.5 m の共振器で、両端に真空箱をおき、その間を内径 34 mm のパイレックスガラス管でつないでいる。励起レーザーおよび 70.5 μm 遠赤外レーザー光の反射鏡としては Au 蒸着した平面鏡を使った。励起レーザー光の入力側の平面鏡は、直径 6 mm のピンホールをあけてある。励起光を二つのレンズを介して、このピンホール上に焦点を結ばせ共振器に導入する。ピンホールからは、遠赤外レーザー光と励起レーザーのもどり光が同時に出てくるが、ピンホールの直後に CO₂ レーザー光に対し、プリュースター角に置かれた KCl 結晶板(厚さ約 3 mm)により、70.5 μm レーザー光のみが反射され、TPX の窓を通して外部に取り出される⁸⁾。

70.5 μm 光は通すが励起光は通さない窓を用い、励起光の入射口とは反対側の窓から取り出す方式も試みた

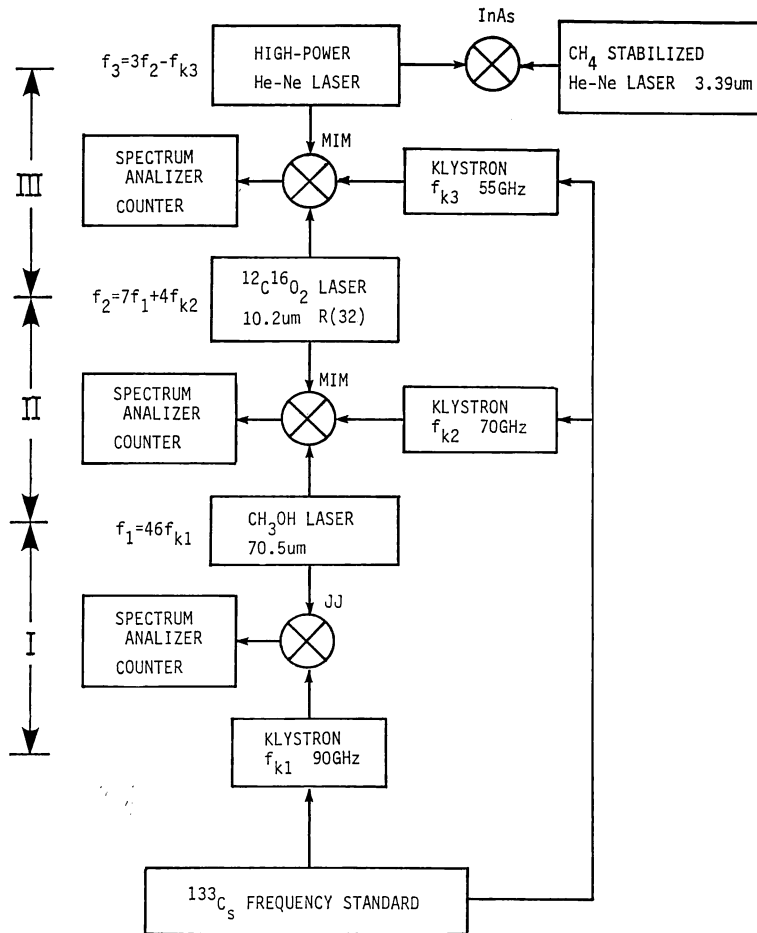


図1 計量研で使っている周波数チェーン

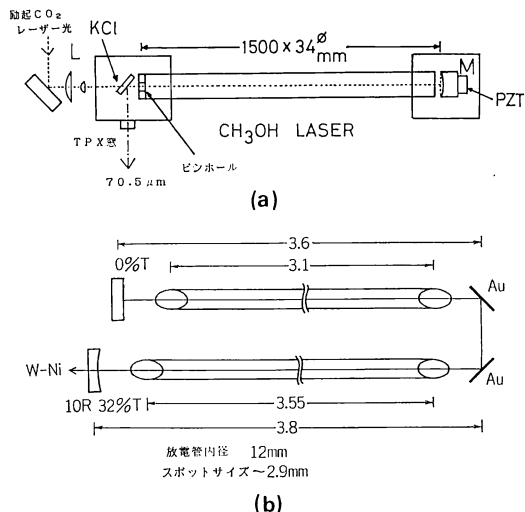


図2 高出力光励起アルコールレーザー共振器(a), 高出力 He-Ne レーザー装置用共振器(b)

が、同じ励起光入力に対し取り出せる出力は前述の方式に比べて少なかった。

共振器長が一定のとき、70.5 μm レーザー光の出力は、ピンホールの径、封入アルコールの圧力、励起光入力に依存する。図の装置で、励起光入力 30 W、アルコールの圧力 33 Pa のときに単一モードで 50 mW の最大出力を得た。励起光入力を上げることでさらに高出力を期待できるが、励起光の増加による反射鏡の熱ひずみを考慮する必要がある。

一般に光励起レーザーでは、励起光の出力曲線の最大強度周波数と発振媒質の吸収のピーク周波数がずれている。70.5 μm レーザーの場合、吸収のピークは約 25 MHz 高周波側にあり、出力曲線の肩になる。このため励起光周波数のわずかなずれが、有効励起光の大きな変化となり、70.5 μm 光の出力変動および発振周波数の変動となる。そこで励起光の周波数安定化が必要とな

る。70.5 μm 光の出力が最大になるように、励起 CO_2 レーザー共振器を制御する方法もあるが、われわれはアルコール (約 13 Pa) を封入した光音響セルから得られるラムディップ信号を用いて安定化した。この方法で、励起 CO_2 レーザーの周波数安定度を 3×10^{-9} にすることができた⁹⁾。

5.1.2 周波数安定化 CO_2 レーザー装置

励起 CO_2 レーザーとは異なって、チェーンの一部に使うため、出力は数百 mW 程度でよいが、高い周波数安定度が要求される。われわれは共振器長 1.2 m, 内径 10 mm のレーザー管を用いた。出力鏡には透過率 25% の Ge 鏡を、他端には 150 本/mm の回折格子を用い波長 10.2 μm (R(32)) を発振させた。安定化には、共振器内に入れた吸収セルに約 13 Pa の炭酸ガスを封入し、セルから出る飽和蛍光線 (4.3 μm) を利用した¹⁰⁾。これにより 3×10^{-10} の周波数安定度が得られた。

5.1.3 高出力 3.39 μm He-Ne レーザー装置¹¹⁾

周波数を絶対測定すべきメタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザーは一般に出力が 1 mW 以下と弱く、周波数測定には直接使えない。そこで高出力のレーザー装置を開発し、メタン安定化 He-Ne レーザーを参照として、約 5 MHz オフセットロックして使った。装置に使った共振器の概略を図 2 (b) に示す。スペースの関係で長さ約 3.5 m のレーザー管 2 本を上、下に配置し、その片側上下に全反射鏡 2 枚を 45° に対向させた全長約 7 m の折返し型共振器とした。一方に平面の全反射鏡、出力側には曲率 10 m, 透過率 32% の誘電体多層膜鏡

を用いた。封入圧力は全圧 333 Pa, 圧力比 He: Ne = 7: 1 とした。この条件下で放電電流 70 mA のとき、最大 45 mW の出力を単一モードで得ることができた。測定すべきメタン安定化 3.39 μm レーザー線の出力自身を増幅し、希望の出力を得ている研究所もある¹²⁾。また 20 mW 程度の出力でビート信号が観測できたとの報告もある¹³⁾。

本装置では鏡の調整だけで単一モード動作を得ている。時間が経つと鏡の再調整が必要となるが、数十分の間は単一モード状態を保ち、測定には十分であった。

5.2 通倍・混合素子

周波数測定に使われる通倍・混合素子を図 3 にまとめる。100 THz 以上まで使えるものとしては、現在タングステン-ニッケル (W-Ni) 点接触ダイオードしかない。数 THz 領域で使えるものは、ショットキーダイオード、ジョゼフソン点接触ダイオード (J-J 素子) などがある。

5.2.1 ジョゼフソン点接触ダイオード¹⁴⁾

J-J 素子は通倍数が高いことが特徴である。われわれが開発した J-J 素子は、図 1 の I 段階で 50 GHz の 85 通倍の周波数を発生させることができた。これはこの領域での通倍数としては現在最大の値である¹⁵⁾。この J-J 素子は図 4 (a) のように直径 70 μm の Nb 細線の先端を電解および化学研磨によって尖らした後、Nb のポスト (直径 2 mm) に機械的に軽く接触させて作る。接触は、クライオスタットにいれた後、液体 He に浸けた状態で行なう。70.5 μm レーザー光はクライオス

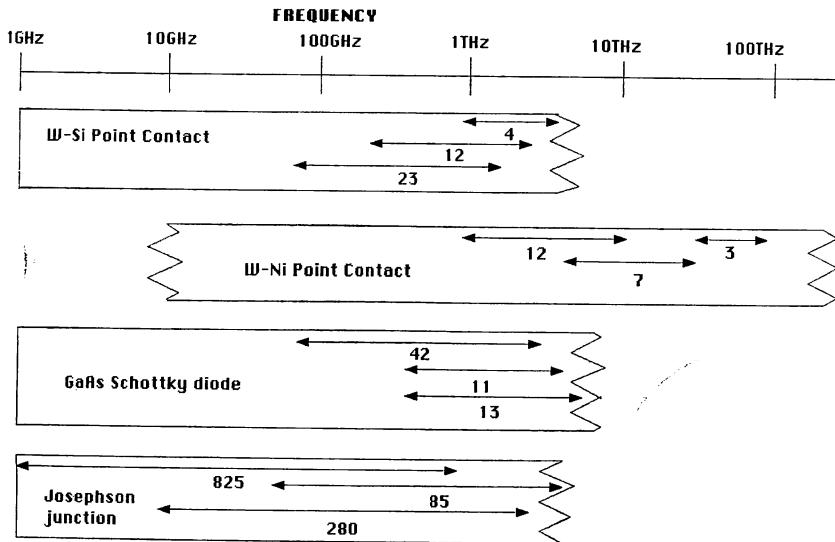
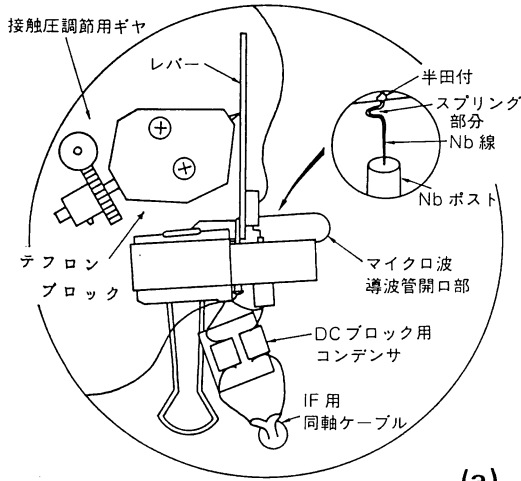
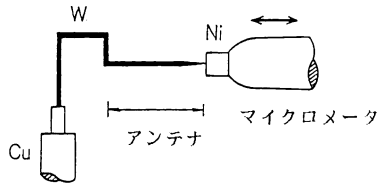


図 3 周波数測定に使われる通倍・混合素子とその使用範囲 (数値は通倍数を示す)



(a)



(b)

図 4 ジョゼフソン素子と W-Ni 点接触ダイオードの構造
 (a) ジョゼフソン素子およびクライオスタットのインサート下部に取り付けたところ、
 (b) W-Ni 接触ダイオード

タットの横に取り付けた石英の窓を通し、またマイクロ波は、インサート部に取り付けた導波管を通して導入した。J-J 素子は、後述する W-Ni ダイオードほど複雑な指向性を示さなかった。

5.2.2 タングステン-ニッケル点接触ダイオード

W-Ni 点接触ダイオードは、現在直流から 150 THz (2 μm) までの広い周波数範囲で使われている。可視領

域でも数 THz の近接するレーザー線のビート信号を検出できるが通倍特性はない¹⁶⁾。製作にはまず直径 25 μm のタングステン細線を図 4 (b) のようにコの字型または L 字型に曲げ、接触の際バネの役割をさせる。その後 100 μm 径の Cu チューブに固定し、電解研磨により先端を尖らす。これを微動装置に取り付けた後、Ni ポストに軽く接触させる。タングステン線の一部が、電磁波に対して進行波アンテナとして動くため、波長によって最適な入射方向がある¹⁷⁾。

通倍・混合および整流は接触部に現われる非線形効果によって行なわれるが、トンネル効果とその機構であると言われている¹⁾。

5.3 ビート信号の観測例と周波数測定

図 1 の I, II, III の各段階で観測されたビート信号を図 5 に示す。どの段階でも信号対雑音比 (S/N) 15 dB 以上が観測された。この値は増幅してカウンタを働かせるために最低必要である。

メタン安定化 3.39 μm レーザーの絶対周波数を測定するには、各段階でのビート周波数とマイクロ波周波数を同時に測定する必要がある。もしビート信号を使ってその周波数が一定になるように他の周波数源を位相ロックできれば、測定すべき周波数の数が減り、測定精度が上がる¹⁾。レーザー装置はその周波数制御に PZT など応答の遅い素子を使うため、位相ロックするのは難しい。そこでわれわれは、II および III の段階でマイクロ波源をビート周波数に位相ロックした。位相ロックによりビート周波数の変動は、他の基準となるマイクロ波 (標準周波数にロックされた X バンド) との間のビート周波数の変動に移される。このビート信号の S/N は 30 dB 以上もあり、カウンタによるビート周波数計測の信頼性を上げることができた。

現在、チェーンの各段階でのビート信号を同時に観測できるようになった。今後は I 段階でも II および III と同

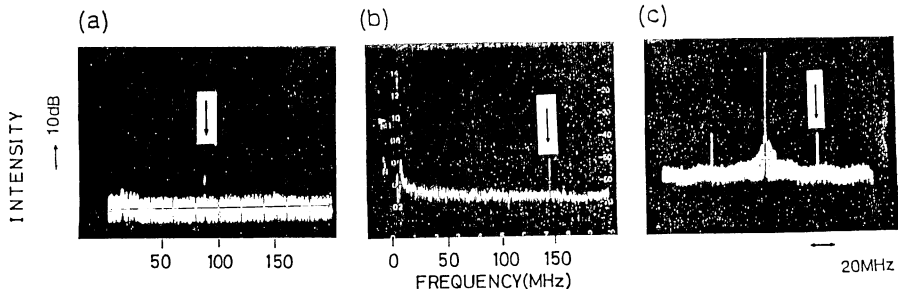


図 5 図 1 の I, II, III 各段階でのビート信号の観測例
 (a) マイクロ波 ~ 70.5 μm, (b) 70.5 ~ 10.2 μm, (c) 102 ~ 3.39 μm

じ位相ロック技術の導入する, アルコールレーザー光の周波数安定化および各周波数源の安定度の向上を図ること, などにより, メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザーの周波数を kHz オーダーの精度で絶対測定する予定である.

6. 周波数測定の今後

W-Ni ダイオードを使った周波数測定は, 波長 2 μm までである. それ以上および可視領域では, 非線形結晶 (たとえば LiNbO₃) が通信素子として使われている¹⁾.

現在当所で Ca 原子ビームの光ラムゼー分光法を使った高安定化色素レーザー装置が開発されている. このレーザー線は, ヨウ素安定化 633 nm He-Ne レーザー線 (推奨されている光周波数標準の一つ) より安定度が良く次世代の光周波数標準の候補である¹⁸⁾. この絶対周波数の測定が, われわれの次の目標となる.

7. 光周波数測定技術のもたらしたもの

光領域で周波数絶対測定ができるようになり, “メートル”の実現精度が向上した¹⁹⁾. 現在定義の実現は主に第3の方法, すなわち仕様をきめたレーザー装置で行なわれている. メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザー光もその一つであるが, その再現性はさらに十分吟味されねばならない. 再現性の測定は各国で独立に製作したレーザー装置を持ち寄り周波数を直接比較測定することで行なってきた. しかし周波数チェーンを使った絶対測定精度が向上した結果, 比較測定ではわからなかった系統誤差要因が観測できるようになり, 従来の仕様の検討が議論され出している. さらに 3.39 μm レーザーの絶対周波数を各国の周波数チェーンを使って測り直そうとする動きもある¹⁹⁾. このほか, 分子定数 (CO₂ 等) の精密な決定にも効果を上げてきた²⁰⁾. 紙面の都合で詳細は略すが, 光領域の周波数で働く時計 (optical clock) の開発, 光通信における周波数分割, リュードベリ定数の精密測定²¹⁾等において, 周波数の絶対測定技術が要望されている.

8. おわりに

光周波数の絶対測定について, 計量研究所の研究を中心に述べた. 周波数の一次標準は, 他の量に比べ精度が高い. 周波数は他の物理量と密接に関係していること, また実用的な面からは光通信の普及が予想されることなどから, 今後いっそう光周波数の測定技術が必要とされるであろう. 当面解決しなければならないことは, より

取扱いの簡単な装置によるチェーンを構築することである. そのため, 高性能な周波数通信・混合素子の開発, そして周波数安定化半導体 (量子井戸構造を含む) レーザー等の導入により, 装置全体の小型化が必要である. レーザー周波数測定技術がより身近に利用できる日がくることを期待している.

文 献

- 1) D. A. Jennings, K. M. Evenson and D. J. E. Knight: "Optical frequency measurements," Proc. IEEE, **74** (1986) 168. 1986年までの結果がまとめてある.
- 2) Comite Consultatif pour la Definition du Metre, 5th Session, BIPM, France (1973).
- 3) "Documents concerning the new definition of the metre," Metrologia, **19** (1984) 163.
- 4) Z. Bay, G. G. Luther and J. A. White: "Measurement of an optical frequency and the speed of light," Phys. Rev. Lett., **29** (1972) 189.
- 5) R. G. DeVoe and R. G. Brewer: "Laser-frequency division and stabilization," Phys. Rev. A, **30** (1984) 2827.
- 6) D. J. Wineland: "Laser-to-microwave frequency division using synchrotron radiation," J. Appl. Phys., **50** (1979) 2528.
- 7) 依田 潤: "イオントラップと高分解能分光", 質量分析, **36** (1988) 187.
- 8) A. Mitsushishi, Y. Yamada, S. Fujita and H. Yoshinaga: "Polarizer for the far-infrared region," J. Opt. Soc. Am., **50** (1960) 433.
- 9) Yan Hanmei, T. Kurosawa, A. Onae and E. Sakuma: "Frequency stabilization of a CO₂ laser by using lamb-dip from a photo-acoustic cell," Opt. Commun. (1989) in printing.
- 10) C. Freed and A. Javan: "Standing-wave saturation resonancies in the CO₂ 10.6 μ transition observed in a low-pressure room-temperature absorber gas," Appl. Phys. Lett., **17** (1970) 53.
- 11) 作間英一, 大井みさほ: "メタン安定化 3.39 μm He-Ne レーザーと 10.2 μ R(30)CO₂ レーザーの周波数比較", 応用物理, **50** (1981) 29.
- 12) P. S. Ering and C. O. Weiss: "Measurement of the frequency of the 3.39 μm CH₄-stabilized HeNe-laser," Opt. Commun., **54** (1985) 299.
- 13) C. O. Weiss, G. Kramer, B. Lipphardt and E. Garcia: "Frequency measurement of a CH₄ hyperfine line at 88 THz/optical clock," IEEE J. Quantum Electron. **QE-24** (1988) 1970.
- 14) Y. Miki and E. Sakuma: "Microcomputer-controlled etching system for reproducible point contact Josephson junction," Int. J. Infrared Mill. Waves, **6** (1985) 599.
- 15) Y. Miki and E. Sakuma: "Frequency mixing of a 50 GHz microwaves and 4.25 THz FIR light by a Josephson point contact," Jpn. J. Appl. Phys., **26** (1987) L1482.
- 16) R. E. Drullinger, K. M. Evenson, D. A. Jennings, F. R. Petersen, J. C. Bergquist and L. Burkins: "Frequency difference measurements in the visible using metal-insulator-metal diodes," Appl. Phys. Lett., **42** (1983) 137.

- 17) E. Sakuma: "Characteristics of W-Ni point contact diodes as infrared antennas," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1977) 38.
- 18) H.H. Klingenberg, H.R. Telle and J. Helmcke: "Extension of the PTB frequency synthesis towards the visible-concept and feasibility studies," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-34**, (1985) 268.
- 19) A. Clairon, B. Dahmani, O. Acef, M. Granveaud, Y. S. Dominin, S. B. Pouchkine, V. M. Tararenkov and R. Felder: "Recent experiments leading to the characterization of the performance of portable (He-Ne)/CH₄ lasers," *Metrologia*, **25** (1988) 9.
- 20) C. Freed, L. C. Bradley and R. G. O'Donnell: "Absolute frequency of lasing transition in seven CO₂ isotopic species," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16** (1980) 1195.
- 21) D. H. McIntyre and T. W. Hänsch: "Precision measurements of the Rydberg constant," *Metrologia*, **25** (1988) 61.
- 22) B. G. Whitford and G. R. Hanes: "Frequency of a methane-stabilized helium-neon laser," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **37** (1988) 179.