レーザーオリジナル

遠赤外レーザー周波数測定のための掃引型FP干渉計

桜井 慧雄*・伊藤 信彦*・石川 純*

(1982年12月20日 受理)

A Scanning Fabry-Perot Interferometer for the Oscillation-Frequency Measurement of Far-Infrared Lasers

Toshio SAKURAI*, Nobuhiko ITO* and Jun ISHIKAWA*

(Received December 20, 1982)

A scanning Fabry-Perot interferometer with capacitive aluminium mesh mirrors, which can roughly estimate the oscillation frequency of far-infrared (FIR) laser for its direct frequency measurement, has been developed. The mesh-mirror separation is measured by using a visible laser interferometer (He-Ne 633nm) of fringes counting type which is associated with the FIR interferometer. Using the Fabry-Perot interferometer, wavelengths of three FIR oscillation lines have been measured for evaluating its measurement error. It has been found that uncertainties in the wavelength measurements are estimated to be less than $\pm 0.1\mu\text{m}$. This value is small enough to carry out the direct frequency measurement.

1. はじめに

近年、光励起遠赤外 (FIR) レーザー研究の進展は目ざましい。年々新しい発振線が発見され、その数は1500本を越えている¹⁾。応用研究の展開もすばらしく、プラズマ診断²⁾、サブミリ波天文学、分子分光³⁾、長さ標準⁴⁾などの分野での跳進が目につく。

いくつかの応用研究では、光励起FIRレーザー周波数を精密測定する必要がある。そして、必要精度の最も高い分野が新しい長さ標準の研究である。そこでは、電磁波の波長 λ が基準となるが、 λ は、 $c=\lambda \cdot \nu$ の関係式から求める。ここで、 c は国際的に決めた光速の値、 ν は精度 10^{-9} 以上で測定した、その電磁波の振動数

である。

筆者らは、長さ標準の立場から、CO₂レーザーの発振周波数を測定する周波数合成チェーンを提案してきた^{5,6)}。そして、この中で、光励起CH₃OHレーザー周波数の精密測定をおこなった。

FIRレーザー周波数の精密測定には、ミリ波とFIR光の「周波数通倍混合技術」を使う。FIR光の周波数 f_{FIR} は、ミリ波の周波数 f_{mm} と中間周波数 f_{IF} を用いて、 $f_{\text{FIR}} = N \cdot f_{\text{mm}} \pm f_{\text{IF}}$ の関係から求まる。ここで、 N は通倍次数である。 f_{mm} は、既成の技術で正確に周波数測定が可能であり、また通倍次数は、FIR光のおおよその周波数があらかじめわかれば決まるから、FIR光の精密周波数測定は、中間周波 (IF) 信号の

*計量研究所 (〒305 茨城県新治郡桜村梅園1-1-4)

*National Research Laboratory of Metrology (1-4, 1-Chome, Umezono, Sakura-Mura, Niihari-Gun, Ibaraki 305)

周波数 f_{IF} の測定に帰着できる。 f_{IF} は、通常、rf-スペクトラムアナライザで周波数測定する。通倍混合素子には、metal-insulator-metal (MIM) diode あるいは Schottky barrier diode などを使う。

あらかじめ知るFIR周波数の詳しきは、以下に述べる状況から、IF周波数測定のしやすさにも密接に関連する。

(i) IF信号強度は、通常 10^{-11} W以下である。この程度の電力の観測では、rf-スペクトラムアナライザの周波数掃引幅は狭く、また、掃引速度を遅く選ばなければならない*。ここで、FIR周波数に大きな誤差が含まれれば、予想できるIF周波数の範囲がその分だけ広がるから、rf-スペクトラムアナライザでIF信号を探すことに、いたずらに長い時間を費やすことになる。特に、MIMダイオードでは、ポストとホイスカーの機械的接触（ダイオードの通倍混合特性に直接影響する）が不安定であるから⁷⁾、IF信号の探索に長い時間がかかれば、実験はそれだけ難しくなる。

(ii) ここでの目的に使うダイオードは、導波管で供給するミリ波と、ビームで供給するFIR光を混合するために、機械的構造は開放型である⁷⁾。それ故、 10^{-11} W以下のレベルでは、IF周波数測定系に多くのノイズが混入する。外来ノイズのスペクトラムは、離散型と連続型が混合したものであり、ノイズが分布する帯域は、帯域内の場所によって強弱はあるものの、rf-スペクトラムアナライザの全観測可能帯域におよぶ。この外来ノイズもIF信号の観測に大きな障害である**。そのため、IF周波数をできるだけ正確に見積り、ミリ波の周波数を変えながら、IF信号をノイズの少ない周波数帯域で観測すれば、実験はそれだけ容易になる。

筆者らは、 $251\mu\text{m}$ CH_3OH レーザー周波数を、あらかじめ1GHzより良い精度で測定すること

を目標とした。これは、主として、使用するrf-スペクトラムアナライザの動作周波数帯域からの制約である。

発振周波数をあらかじめ知るには、発振波長を測定し、光速度をその測定値で割る方法がある。そして、その波長測定には、出力同調曲線の利用が簡便と思える***。しかし、筆者らの光励起 $251\mu\text{m}$ CH_3OH レーザーで、発振波長の測定精度は高々 $1\mu\text{m}$ であった。これは、 $251\mu\text{m}$ 線の周波数に換算すると、4GHzに当るから、目標の精度にはおよばない。そこで、測定精度を高めるために、レーザー共振器外に置いて使う $251\mu\text{m}$ 帯用掃引型ファブリペロ干渉計を試作し、発振波長測定をおこなった****。

この干渉計は、zカット熔融石英板にcapacitive meshをAl蒸着した反射鏡をもち⁸⁾、鏡面間隔の変化をフィゾー干渉計（光源はHe-Ne 633nmレーザー）で読み取るものである。

本稿は、試作した掃引型ファブリペロ干渉計の構造、動作、および光励起 $251\mu\text{m}$ CH_3OH レーザーで発振する $163\mu\text{m}$ 、 $251\mu\text{m}$ 、 $469\mu\text{m}$ 線でおこなった波長測定精度の評価について述べる。

2. 試作したファブリペロ干渉計

2.1 干渉計の構成

試作したFIR帯用ファブリペロ干渉計の概念図をFig.1に示す。この干渉計は、反射鏡 M_1 、 M_2 で構成するFIRファブリペロ干渉計、反射鏡（無コーティングのオプティカルフラット） M_3 、 M_4 で構成する可視域フィゾー干渉計、のふたつからなる。ここで、 M_1 と M_3 、および M_2 と M_4 は、それぞれ一体のホルダ H_1 および H_2 に格納してあり、ホルダ H_1 は固定、 H_2 は可動型として使う。後者の干渉計は、He-Ne 633nmレ

***) FIRレーザー利得曲線幅は、通常、縦モード間隔より狭いから、出力同調曲線上では、共振器長を発振半波長だけ変えるごとに、鋭い発振出力ピークが観測できる。

****) $251\mu\text{m}$ 線は、Petersenらによって周波数が精密測定されている(文献15)。しかし、この測定しか見当たらないこと、また、筆者らの線が、彼らの線と同一であることを確かめるためにおこなった。

*) これはrf-スペクトラムアナライザの動作原理からの制約である。

**) ノイズを測定系から断する試みをおこなったが、困難であった。

Fig.1 Schematic of a Fabry-Perot interferometer for far-infrared wavelength measurements. M_1 and M_2 , capacitive aluminium-mesh mirrors with a z-cut crystal quartz substrate; M_3 and M_4 , glass optical flats; H_1 and H_2 , mirror holders; L, TPX lens with a focal length of 100mm; D_1 , pyroelectric sensor; D_2 , Si-photodetector. This interferometer consists of FIR (M_1 and M_2) and visible (M_3 and M_4) interferometers. H_2 is movable and is placed on a linear-translation-stage which runs on ball-bearing rails. The displacement of H_2 is measured by the visible interferometer counting the interference fringe.

ザーを光源とし、ホルダ H_2 の移動量を、干渉縞の計数で測定するものである。

H_2 は、可動部が長さ200mm、幅100mmのボールステージに搭載し、差動マイクロメータ（みつとよMHF₂-2.5V）で平行移動できる。マイクロメータの駆動は、減速ギヤ付小型直流モータでおこなう。両者の間に緩衝材は使用していない。振動などの影響による干渉縞のミスカウントを防ぐために、干渉信号の増幅器には、ローパスフィルタ特性（-3 dB:10Hz, 6dB/oct）を持たせてある。

2.2 FIR帯用反射鏡

ファブリペロ干渉計では、高い反射率をもつ鏡が必要である。FIR帯での高反射率鏡は、Ulrichが研究した金属メッシュ鏡およびワイヤ

グリッド鏡⁹⁾、Danielewiczが開発したMMD鏡¹⁰⁾、Wolfeのcapacitive mesh鏡¹¹⁾などがある。ここでは、有効径38mmのWolfe型capacitive mesh鏡を使用した。これは、zカット結晶水晶基板に、Niメッシュをマスクとし、Alを真空蒸着したものである⁹⁾。2枚の鏡は同一規格のもので、約30mm間隔で置き、ファブリペロ干渉計として使う。メッシュは、格子定数が $102\mu\text{m}$ 、リボン幅が $30\mu\text{m}$ のものを用了。

zカット結晶水晶は、可視および遠赤外（ $\lambda > 50\mu\text{m}$ ）で透明な材料であるから、He-Ne633nmレーザーが鏡の平行度調整に使える。使用した基板の平面度は可視光で3縞、平行度は1分である。

2.3 可動鏡の平行移動特性

可動鏡の微動送りでの最大移動量は、2.5 mm である。可動鏡の平行移動特性を、最小目盛10 秒のオートコリメータで調べた。その結果、移動による平行度のくるいは認められなかった。平行移動は等速でおこない、その速度は、約0.1 mm/minである。

2.4 干渉計の調整

ファブリペロ干渉計の2枚の鏡 M_1 , M_2 は、
(i) 互いに平行、かつ、(ii) CH_3OH レーザ
ー光軸に垂直におき、(iii) 鏡の中心に CH_3OH
レーザーの光軸を通す必要がある。これらを実
行するために、市販の内部鏡型 He-Ne 633 nm
レーザーを利用した。

まず、He-Ne 633 nm レーザーを、 CH_3OH レ
ーザーの出力窓より約1 m 離して向き合わせて
置き、633 nm 光ビームと、 CH_3OH レーザ
ーの光軸を一致させる。この調整ができたならば、フ
ブリペロ干渉計を両レーザーの中間点におき、
633 nm 光ビームが、capacitive mesh 鏡の中心
を通るように、干渉計の位置を目測で調整する。
この段階で、2枚のcapacitive mesh 鏡からは、
肉眼で見えてほぼ同一光量の十文字状の回折光が
He-Ne レーザー側に反射してくる。この回折光
をFig. 2 に示す。次に、十文字の交点の輝度は
最も高いが、この点どうしがHe-Ne レーザーの
出射口近傍で重なるように鏡の傾きを合わせ込
む。可動鏡をゆっくりと掃引すれば、十文字の
の交点が見やすいので、平行度の調整が容易に
なる。その後、干渉計全体を微少回転し、十文
字の交点を完全に He-Ne レーザーの光軸上に
返す。ここまでの作業で、鏡の垂線と CH_3OH レ
ーザー光軸とは、 $90^\circ \pm 3'$ 以内に調整される。

平行度のさらに細かい調整は、FIR 光の透過
光強度曲線の形を見ておこなう。2枚の鏡のな
す角を α 、約30 mm ある鏡面間隔での干渉次数を
 m とした時、 $m\alpha^2$ が充分小さければ、得られる
透過光強度曲線が最大強度点に対して対称であ
り、フィネスは最大になるから¹²⁾ このことを利
用して平行度をさらに良くできる。

Fig. 3 は、平行度調整が完了したファブリペ

Fig. 2 Photograph of reflected He-Ne 633 nm laser beam from the capacitive aluminium-mesh mirrors of Fabry-Perot interferometer when the two mirrors are adjusted nearly parallel.

Fig. 3 Transmission profile of the Fabry-Perot interferometer obtained by using the 251 μm radiation after the adjustment of parallelism is finished. The finess and the reflectivity at 251 μm are measured to be 21 and 86 %, respectively.

口干渉計で得た $251\mu\text{m}$ 線の透過光強度曲線である。フィネスは21, 曲線の対称性からの平行度は30秒以内である。¹²⁾

フィネス Θ が充分高いファブリペロ干渉計で, Θ は、関係式 $\Theta = \pi\sqrt{R/(1-R)}$ によって、メッシュ鏡の強度反射率 R と結べる。¹³⁾この式と実測したフィネスから、3本の線でのメッシュ鏡の強度反射率は、 $163\mu\text{m}$ 線で74%, $251\mu\text{m}$ 線で86%, $469\mu\text{m}$ 線で64%を得た。Capacitive meshの強度反射率は、Ulrichの理論⁹⁾では、 $163\mu\text{m}$ 線が最も高くでははずである。 $163\mu\text{m}$ での強度反射率が $251\mu\text{m}$ 線より低い原因は、(i) $163\mu\text{m}$ 線が理論の成立限界 $g/\lambda \leq 0.7$ に近いから、理論の精度が悪くなったこと、あるいは、(ii) 基板のファブリペロエタロン効果による。ここで、 g は格子定数、 λ は入射波長である。

金属メッシュの理論では、 $g/\lambda \leq 0.7$ ならば、メッシュは光学的に等方特性をもつ反透明鏡である。⁹⁾用いた3本の線は、いずれもこの条件を満たす。しかし、Fig. 3で示した左右対称な透過曲線は、メッシュ鏡のリボンの向きが同一方向の時にのみしか得られなかった。この原因は、使用したメッシュ鏡の異方性（蒸着したメッシュの画素の形状が、鏡面上の場所によって多少異なる）に起因すると考えるが、現在、究明中である。

フィゾー干渉計の鏡 M_3 , M_4 は、capacitive mesh鏡 M_1 , M_2 とは独立したネジで平行度の調整ができる。 M_3 , M_4 の調整は、 M_1 , M_2 の調整が完了後、 633nm 干渉縞が全面同一の干渉次数になるように傾きを調整する。

3. 光励起 $251\mu\text{m}$ CH_3OH レーザー

FIR用ファブリペロ干渉計の精度評価には、筆者のひとりが試作した光励起 $251\mu\text{m}$ CH_3OH レーザーを用いた。FIR共振器長は 2.1m 、内径 $39.6\text{mm}\phi$ のPyrex導波管型である。⁸⁾このレーザーは、 25W の CO_2 レーザー10R (38) 線励起で、 $163\mu\text{m}$, $251\mu\text{m}$, $469\mu\text{m}$ 線が、それぞれ、 34mW , 18mW , 8mW の EH_{11} モードで発振する。干渉計の精度評価をおこなう時には、各線の出力

が、上記出力のおおよそ $1/3$ である。出力モードは EH_{11} である。また、発振周波数を手動でFIR線のline centerに同調し、波長測定をおこなう。

4. 波長測定法

波長測定は次のようにおこなう。Fig. 1において、まず、可動鏡に $0.1\text{mm}/\text{min}$ で等速送りをかける。それによって、フォトダイオード D_2 では、 633nm 干渉縞信号が約 5Hz で検出される。また、焦電検出器 D_1 では、FIR光の干渉縞信号を受ける。

可視光干渉縞カウンタのゲートは、FIR光の透過光強度が、その干渉次数での最大値の $1/2$ になった瞬間に、手動で開く。そして、 $163\mu\text{m}$ および $251\mu\text{m}$ 線では干渉次数を10だけ、また、 $469\mu\text{m}$ 線では5だけ変えた次数でのFIR干渉縞の強度が、その次数での最大透過光強度の $1/2$ になった瞬間に、手動でカウンタのゲートを閉じる。 $1/2$ 強度点を干渉縞計数の基準点にした理由は、その点では、可動鏡の位置変化に対するFIR干渉縞強度の変化率が、最大値に近いから、可動鏡の位置決めに正確さを期せるためである。

こうして求めたカウンタの読みに、 $0.316412\mu\text{m}$ (633nm 光の 20°C , 1気圧 での半波長)をかければ、10山測定*ではFIR光で5波長、5山測定ではFIR光で2.5波長に相当する可動鏡の移動距離が求まる。

5. 波長測定結果

3本の CH_3OH レーザー線についておこなった波長測定結果をTable Iにまとめる。また、Table IIは、Table Iを周波数で表現した表である。Measured wavelengthおよびfrequencyは、いずれも、line centerの値である。Table Iから、10山測定10回の平均で、3本の線の標準偏差が約 $0.1\mu\text{m}$ であることがわかる。ただし、 $469\mu\text{m}$ では、標準偏差の値を $\sqrt{2}$ で割って考えた。

*) FIR光干渉次数を10次分だけ変えるように可動鏡を掃引する測定。

Fig.4 Typical interferogram of the Fabry-Perot interferometer obtained by using the $251\mu\text{m}$ radiation. The movable mirror is translated by a distance of ten transmission peaks.

Table I. Summary of the wavelength measurements.

Wavelength (μm)	Red fringe count	Measured wavelength (μm)	Standard deviation (μm)
163	2575.9 ± 1.2	163.01	0.076
251	3968.2 ± 1.1	251.14	0.070
469	3705.8 ± 1.5	469.02	0.190

- a) Each figure is an average of ten readings and its standard deviation. Each reading is taken when a FIR mirror is translated by ten-transmission=peak distance in the $163\mu\text{m}$ and $251\mu\text{m}$ lines, and five-transmission-peak in the $469\mu\text{m}$ line, respectively.
- b) Calculated with a red wavelength of $0.632\ 8844\ \mu\text{m}$ in air.

Table II. Evaluation of the wavelength measurements in the frequency domain.

Wavelength (μm)	Frequency (GHz)	Uncertainty ($\pm\text{GHz}$)	Frequency ^a difference (GHz)
163	1839.11	0.88	0.27
251	1193.82	0.32	0.09
469	639.19	0.26	0.01

- a) Frequency difference between the frequency converted from the wavelength, and the directly measured frequency. See Ref. 15.

Table II で frequency は、光速 $299\,792\,458\ \text{m/s}$ を、Table I の measured wavelength で割った値である。Uncertainty は、Table I の standard deviation を周波数に変換したものである。Frequency difference は、第 2 行目の frequency の値から、 $251\mu\text{m}$ および $469\mu\text{m}$ 線で桜井らがおこなった精密周波数測定の値¹⁴⁾ または、3本の線について Petersen らがおこなった測定の値¹⁵⁾ を差し引いた値である。

Table II から、 $251\mu\text{m}$ および $469\mu\text{m}$ につい

Table III. Summary of measurement errors.

Accidental error	Uncertainty ^a ($\pm\mu\text{m}$)
1. Positioning in the FIR fringe	
Manual start/stop for red fringe counting	0.01
FIR output fluctuation	0.04^b
2. ± 1 count error	0.03
3. Mechanical vibration	} ~ 0.04
4. Fluctuation of the refractive indexes of air ^c	
5. Thermal expansion of the interferometer	
6. Fluctuation of wavelengths ^c	~ 0
Systematic error	
1. Correction for the refractive indexes of air ^c	0.07^d
2. Back-talk from the interferometer	~ 0
3. Axis-alignment between the FIR laser and the interferometer	~ 0
4. Divergence of laser beams ^c	~ 0

- a) Uncertainty included in each measured wavelength. It is estimated for the ten-transmission-peak measurement of FIR fringe.
- b) Estimation at $251\mu\text{m}$ where finesse=20, and FIR output fluctuation=10% of the averaged output.
- c) Including both contributions in the visible and FIR regions.
- d) Extrapolation by the Edlén's formula.

では、uncertainty および frequency difference と、目標に選んだ $1\ \text{GHz}$ より小さい値を示すことがわかる。 $163\mu\text{m}$ 線の uncertainty が大きい理由のひとつは、他の線に比して波長が短いにもかかわらず、他の線とほぼ同じ standard deviation をもつためである。(Table I 参照)。ポールステージのストロークは 2.5mm あるから、 $163\mu\text{m}$ 線に対しては、干渉次数の変化が10次より多い測定をおこなうことで、standard deviation を小さくできる。

Fig.4 に、 $251\mu\text{m}$ 線でおこなった干渉縞の10山掃引での時間送りチャートレコーダの記録を示す。横軸は鏡面間隔、縦軸は透過光強度であ

る。記録間隔AおよびBでは、可動鏡の掃引を止めてあるから、短周期（1～5s）の出力変動の大きさが、全出力の10～15%あることがわかる。

6. 測定誤差の分析

Table III は、誤差要因の一覧表である。表は、干渉次数変化が10次であるFIR干渉縞を観測した時に、推定できる誤差を見積っている。

偶然誤差では、FIR出力の出力変動によるばらつきが最も大きい。この値は、251 μm 線での干渉計の代表的特性（finess=20, output fluctuation=10%）で見積っているが、finessが小さく、あるいはfluctuationが大きくなると、この値はそれだけ悪くなる。

手動操作による633nm干渉縞の計数誤差は、オシロスコープと低周波発振器によるシュミレーションから推定した*。

第1, 2項に示した偶然誤差の自乗和の平方根は0.05 μm となる。この値を、Table Iに示した251 μm 線のstandard deviation 0.07 μm と比較すれば、約0.04 μm の偶然誤差が第3～5項に示す原因から発生しているはずである。これに関して、筆者らは、第3項の効果が大きいと考える。しかし、正確には、干渉計のモータ駆動にクッションを介する実験をおこない、その結果との比較対照が必要である。

633nm光およびFIR光の波長ゆらぎは、大きくても 10^{-7} の桁であるから、他の偶然誤差に比べ無視できる。

系統誤差の中で、空気屈折率の問題は、物理

*) 例えば、251 μm 干渉縞をひと山記録する時間は、おおよそ10sである。まず、低周波発振器で周期10sの正弦波を発生させ、これを、横軸の掃引を止めたオシロスコープの縦軸に入力し、振幅6cmの輝点の単振動を観測する。FIR干渉縞の強度度点はチャートレコード上で観測するが、オシロスコープの輝点の振幅は、チャートレコード上の記録寸法とほぼ同じである。輝点がブラウン管の中点を通過する瞬間にカウンタのゲートを開け、1msのパルスクロックを計数する。輝点が再び中点を通過する瞬間に手動でゲートを閉じる。この操作を20回反復し、ブラウン管の中点から中点までの時間間隔のばらつきを求め、波長測定での手動操作の影響を推定した。

的に興味深い。可視光でのEdlénの空気屈折率補間式は、3 μm の赤外線でも成立することが確かめられたが、¹⁶⁾ それ以上長い波長での報告は見当らない。Table IIIに示した量は、Edlénの標準空気屈折率の式に、便宜上、FIR線波長の値を代入したものである。

FIR領域では、水蒸気などの吸収による異常分散のため、屈折率が急変する波長の存在が予想できる。坂井の吸収係数測定の結果¹⁷⁾を参考にすると、163 μm , 251 μm , 469 μm では、吸収のピークは見当らないが、目標とする波長測定精度によっては、吸収ピークの裾の屈折率への影響を考慮する必要がある。しかし、結論として、Table IIIに示した偶然誤差で3つの波長を測定する限り、空気屈折率の補正は、測定精度に決定的な影響をおよぼさない。

バックトークは、FIRレーザーの発振波長に影響するが、その影響は、FIR共振器長が発振半波長変わるとに、周期的に反復するので、ここでの波長測定値には影響がないと考えた。また、光軸のアラインメントのくずれ α は余弦誤差を生じ、測定値は、 $1 - \alpha^2/2$ 倍の変化を受けるが、 $\alpha \leq 10^{-3}$ (約3') であるから、その影響は小さい。回折拡がりによる誤差は、伊藤の誤差解析を参考にして算出したが、¹⁸⁾ 無視できる量である。

7. 結 論

光励起FIRレーザー周波数を精密測定する準備として、その周波数をあらかじめ1GHzより良い精度で測定するFIR帯用ファブリペロ干渉計を試作した。そして、その性能を評価するために、3本の光励起CH₃OHレーザー線で波長測定をおこない、光速度cとの割算から、おおよその発振周波数を求めた。その結果、測定した発振周波数のばらつき、その平均値の精密測定値からの偏差、のいずれもが1GHzより良い精度を示すことがわかった。ただし、163 μm 線については、20山～30山測定が必要であろう。

測定誤差の分析結果は、FIR光の出力変動、および、 ± 1 カウント誤差による偶然誤差が、

大きい比重をしめることを示した。さらに測定精度を向上するためには、本報告でおこなった掃引をさらに長い掃引にすれば良い。しかし、本装置でとった準備データをもとに、 $251\mu\text{m}$ および $469\mu\text{m}$ 線について周波数の精密測定ができたことは、その目的に対しては、本装置が精度的に十分な性能を持つといえる。

8. 謝 辞

ファブリペロ干渉計の機械的設計に対し、有益な助言をいただいた計量研究所第一部光学計測課長清野昭一氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 山中：応用物理 **49** (1980) 813.
- 2) 例えば、西沢，野田，藤田，山中，武田，岡島，牧野，長坂，小泉，篠崎，高井，村上，長島，綱脇，近，近藤，仲田：核融合研究 **45** (1981) 476.
- 3) 例えば，J. O. Henningsen: IEEE J. Quantum Electron. **QE-13** (1977) 435.
- 4) 例えば，D. J. E. Knight, G. J. Edwards, P. R. Pearce, and N. R. Cross: IEEE Trans. Instrum. Meas. **IM-29** (1980) 257.
- 5) 田中，桜井，伊藤，黒沢，盛永，岩崎：第42回応物学会予稿集 (1981秋) p. 190.
- 6) K. Tanaka, T. Sakurai, N. Ito, T. Kurosawa, A. Morinaga, and S. Iwaski: Proc. Precision Measurement and Fundamental Constants II, June 1981, NBS Gaithersburg.
- 7) 黒沢，田中，桜井：レーザー研究 **9** (1981) 547.
- 8) 桜井：レーザー研究 **10** (1981)
- 9) R. Ulrich: Infrared Phys. **7** (1967) 37.
- 10) E. J. Danielewicz and P. D. Coleman: Appl. Opt. **15** (1976) 761.
- 11) S. M. Wolfe, K. J. Button, J. Waldman, and D. R. Cohn: Appl. Opt. **15** (1976) 2645.
- 12) 豊田，桜井：計量研究所報告 **20** (1971) 23.
- 13) M. Born and E. Wolf: Principles of Optics (4-th Ed.), Pergamon Press (London, 1970) p. 328.
- 14) T. Sakurai, T. Kurosawa, and A. Morinaga: to be published.
- 15) F. R. Petersen, K. M. Evenson, D. A. Jennings, J. S. Wells, K. Goto, and J. J. Jiménez: IEEE. J. Quantum Electron. **QE-11** (1975) 838.
- 16) H. Matsumoto: Metrologia **18** (1982) 49.
- 17) K. Sakai: Appl. Opt. **11** (1972) 2894.
- 18) 伊藤：計量研究所報告 **28** (1979) 63.