



## 遠赤外ガスレーザーの安定化

岡島茂樹

中部大学\*工学部応用物理学科 〒487 春日井市松本町 1200

(1984年2月9日受理)

### Stabilization of Far-infrared Gas Laser

Shigeki OKAJIMA

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Chubu University,\*  
1200, Matsumoto-cho, Kasugai 487

#### 1. ま え が き

波長  $25\ \mu\text{m}$  から  $1\ \text{mm}$  の遠赤外 (far-infrared, FIR) 領域の分子レーザーの研究は 1964 年の  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCN}$  放電励起レーザーに始まり<sup>1,2)</sup>, 1970 年の光励起レーザーの出現<sup>3)</sup> で飛躍的に発展した. いまでは遠赤外レーザー線はその波長領域のほぼ全域を埋めている<sup>4-7,84)</sup>. 研究が進むにつれて, 遠赤外レーザーは非常に広い分野の応用研究と深く係わるようになってきた<sup>6-8)</sup>. たとえば近年エネルギー研究の一環である核融合のための炉心プラズマの研究が進み, 高温・高密度プラズマが得られるようになってきた. そのようなプラズマの電子密度, 密度揺動, イオン温度, 電流密度分布等の重要な物理パラメータの測定に遠赤外レーザーが適している<sup>9-11)</sup> ことから, この分野で非常に多く使われるようになってきた. これら応用研究が進むにつれて, それぞれの目的に適したレーザーの要求が強まり, より完成度の高い遠赤外レーザーを旨とした研究が活発に進められるようになった. 遠赤外レーザーとその応用については多くの解説がある<sup>6-8)</sup>のでそれを見られたい.

遠赤外レーザーを計測用光源として用いる場合, (1) レーザーの操作が簡単で, (2) 測定に適した出力と安定度が得られ, (3) 装置として安価であることが望ましい. 測定結果の精度や信頼度の点でとくに重要なのがレーザーの安定性である. ここでは cw 動作の放電励起遠赤外レーザーおよび光励起遠赤外レーザー (励起用

$\text{CO}_2$  レーザーを含む) の安定化について述べる. その内容は  $10^{-13}$ ~ $10^{-15}$  の安定度が議論される“長さ標準”や“絶対周波数測定”のための極限的な安定性を旨とした安定化<sup>12-14)</sup>よりも, むしろ各種計測にできるだけ手軽に使える遠赤外光源を目的とした安定化に重点を置く.

#### 2. レーザーの出力および周波数を不安定にする要因

遠赤外レーザーも他のレーザー同様, 増幅機能をもつレーザー媒質, 共振器と光学系, それを取り囲む環境で構成されている. この構成要素の各種パラメータの変化およびそれらの間の相互作用が重なってレーザーの出力や周波数が変動する. その程度はレーザーの構造および発振機構によって異なる. 遠赤外レーザーの出力や周波数を不安定にする要因を励起方法の違いも考慮してまとめると表 1 のようになる.

#### 3. レーザーの安定化

レーザーを安定化する場合, まず(1)レーザーの利用目的, (2)利用形態, および(3)必要とする精度, を考え, 次に①周波数の安定性か出力の安定性か, ②どの程度の安定度が必要か, ③短時間の安定性か長時間の安定性か, ④絶対値が必要か, ⑤再現性をどこまで要求するか, ⑥安定化に際してレーザー周波数に内部変調を加えてよいかどうか等を判断し, さらにシステムの操作性や経費等を考慮して, 利用に適した安定化をするのが得策である.

もちろん, 帰還系による安定化をする前にフリーラン

\* 旧称: 中部工業大学 Formerly: Chubu Institute of Technology

表 1 レーザーを不安定にする要因

項	目	放電励起	光励起
A. レーザー増幅媒質の利得の変化			
(a) レーザー媒質の変化			
(i) レーザー分子数の変化		○	○
(ii) 管内分子の成分比の変化		○	○
(iii) 圧力・流量の変化		○	○
(iv) 温度・励起パラメータの変化による分布の変化		○	○
(b) 励起パラメータの変化			
(v) 放電電圧・電流, 電流分布, 放電状態の変化		◎	
(vi) 励起光の周波数・出力の変化			◎
B. レーザー共振器の共振周波数およびQ値の変化			
(c) レーザー共振器の共振周波数の変化			
(vii) 温度変化による共振器長の変化		◎	◎
(viii) 機械的・音響的振動による共振器長の変化		○	○
(ix) Aによるレーザー管内の屈折率変化		○	○
(x) 共振器内の空気層のゆらぎによる屈折率変化		○	○
(xi) 共振モードの変化		○	○
(d) レーザー共振器のQ値の変化			
(xii) 温度変化および温度分布の不均一による光軸の変化		○	○
(xiii) 機械的・音響的振動による光軸の変化		○	○
(xiv) 鏡・窓等光学素子の反射率・透過率の変化		○	○
C. その他			
(xv) 機械的振動・温度変化によるレーザー管・電極の変化		○	○
(xvi) 外部光学系からのレーザー光のフィードバック		○	◎
(xvii) 外部電場・磁場の影響		○	○

◎印はとくに重要な要因を示す。

ニング動作での安定化(表1に対する対策)をできるだけしておかねばならない。そのためにはまず機械的に安定であることが重要である。真空ポンプ, エアコン, 空冷用ファン, 人の歩行やドアの開閉等はレーザー管, 共振器, プリユースター窓, ビームスプリッター, 光学ミラー等に機械的・音響的振動を与える。また温度変化やレーザー各部の温度分布の違いはレーザー管の変形, 共振器長の変化, 光軸のずれ, 屈折率や透過率の変化の原因となる。したがって, レーザー架台の構造や強度, レーザー管の支持方法, 共振器用ミラーホルダーおよび光学窓や光学素子の材質・強度および支持方法等を工夫するとともに, レーザー装置全体の防震対策も考えねばならない。また, 外部鏡方式では光ビームの通路の空気層のゆらぎは屈折率変化の原因となるので, 光ビームの通路を覆ったほうがよい。遠赤外線は水蒸気等によく吸収されるので, レーザーから測定器までの距離が長い場合はその通路を乾燥窒素等で置換するほうがよい。

さらに, 外部光学系からレーザー共振器内へのレーザ

ー光のフィードバック(バックトーク)も周波数および出力を不安定にする<sup>23)</sup>ので, その対策もしなければならぬ(光励起レーザーでの対策は5.3節で述べる)。

### 3.1 レーザー周波数の安定化

よく知られているようにレーザー共振器の共振周波数 $\nu$ は共振器長 $L$ で決まり, 長さの変化 $\Delta L$ による周波数変化 $\Delta\nu$ は $|\Delta\nu/\nu| = |\Delta L/L|$ で与えられる。したがって, レーザーの周波数を安定化するためには $\Delta L$ を小さくする必要がある。その対策として共振器間隔を熱膨張率の小さい材料(たとえばインバーロッド:  $0 \sim 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , パイレックスガラス:  $3.0 \sim 3.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , 石英ガラス:  $0.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , ネオセラムガラスロッド:  $\pm 1 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ )や, 温度制御した水を流した石英ガラス<sup>15, 16, 20, 21)</sup>やステンレスパイプ<sup>18)</sup>を用いて固定したり, 熱膨張による長さの変化を補正する構造<sup>19)</sup>にしたりする。それでも, たとえば波長 $100 \mu\text{m}$ , 共振器長 $2\text{m}$ のレーザーで $150 \text{ kHz}$ 以内の周波数の安定度を得ようとすると $\Delta L$ を $0.1 \mu\text{m}$ 以内にしなければならない。すなわ

ち、熱膨張率  $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  の材料で共振器長を固定した場合、温度変化を  $0.05^{\circ}\text{C}$  以内に抑えなければならない。ところが実際は実験中に環境温度がかなり変化し、実験者がいることによる温度変化も無視できない。また、放電励起レーザーでは放電管は発熱体であり、しかも温度分布は一様でない。さらに、レーザー媒質や励起パラメータ（電流、電圧、放電状態等）の変化による屈折率変化も起こる。光励起レーザーでも入射励起光による光学系の熱変化が大きい。したがって、“passive な安定化”には限界があり、できるだけ安定化の対策を講じた後に目的に応じて帰還系による“active な安定化”をすることが必要である。

レーザー共振器長を帰還制御するためには、まず基準周波数  $f_0$  を見だし、安定化すべき周波数  $f$  の  $f_0$  からのずれの大きさ  $|f_0 - f|$  およびその方向（符号）を与える誤差信号が必要である。この誤差信号を得る方法として、(A)レーザー発振線や分子の吸収線に周波数変調を与え、そのときのレーザー出力または吸収物質の透過光強度の変化を変調周波数で位相検出すること（レー

ザー出力曲線や分子の吸収曲線の微分になる）により得る方法と、(B)変調を与えないで、安定化すべき周波数  $f$  に対応する量、たとえば電圧  $V$  に変換し、基準周波数  $f_0$  に対応する  $V_0$  と比較して、その差  $(V - V_0)$  から得る方法、がある。そして、この誤差信号をゼロにするように共振器長を制御して安定化する。再現性よくしかも高精度で基準周波数  $f_0$  に安定化するためには次のことが大切である。

- (1) 再現性がよく  $f_0$  が設定できること
  - (2) (A)の場合は  $f_0$  の幅が狭く、しかも誤差曲線の  $f_0$  に対する対称性がよいこと
  - (B)の場合は  $f_0$  からのずれに対する誤差信号の直線性がよく、しかも勾配が急であること
  - (3)  $f_0$  で誤差信号が正確にゼロになること
- 共振器長を帰還制御して安定化する場合単一モード発振していることも大切である。

実際例は4, 5章で述べる。

### 3.2 レーザー出力の安定化

まずレーザー管内の媒質の状態（分子数、成分比、圧

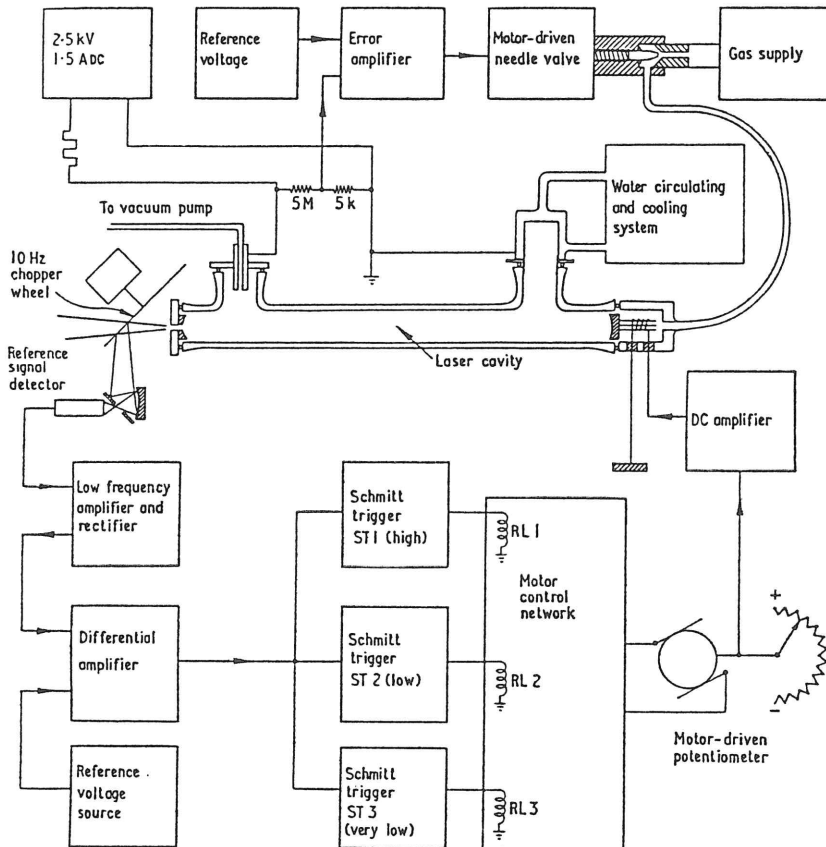


図1 HCN レーザーの共振器長およびガス圧力の制御系<sup>27)</sup>

力, 流量) を一定にする必要がある. そのためには高精度ニードルバルブを通してガスを導入し, 連続排気動作させる. さらにレーザー管と真空ポンプの間やガス導入バルブとレーザー管の間にバラストタンクや混合用タンクをつけたり<sup>24,25</sup>, ガス導入系に風船をつけたり<sup>26</sup>する. Llewellyn-Jones ら<sup>27</sup>は HCN レーザーの管内圧力が増加すると電極間電圧が変化することを利用して, ニードルバルブに取り付けたモーターの回転を制御して圧力および放電電圧を安定化した (図 1).

次に励起パラメータ (放電励起レーザーでは放電電圧, 電流, 放電状態, 光励起レーザーでは励起用 CO<sub>2</sub> レーザーの周波数, 出力) の安定化が重要であるが, これについては 4, 5 章で述べる.

さらに, 遠赤外レーザーでは一般にレーザーの利得幅 (ドプラ幅が支配的) が共振器の縦モード間隔より狭いために, 共振周波数変化のレーザー出力に与える影響が大きく, 3.1 節の周波数の安定化は出力を安定化するためにも重要である.

#### 4. 放電励起遠赤外レーザーの安定化

代表的な H<sub>2</sub>O, HCN レーザーはレーザー共振器内で, (1) これらの分子が放電により励起され, (2) 異なる二つの振動状態間の緩和の違いおよび振動回転準位間の偶然的な共鳴相互作用により, (3) 反転分布をつくり, 大きな遷移モーメントを得て, (4) レーザー発振するものである. HCN レーザーは CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub> (または NH<sub>3</sub>) 等, C, H, N を含む分子の放電プラズマ中で生成される HCN による発振であるが, また同時に, 放電プラズマ中の各種励起分子, イオン, ラジカル等の壁での反応でできる褐色のポリマーの管壁や鏡への付着堆積の問題 (これは長時間の高出力安定動作を困難にする) もあり, 内部の機構は複雑である.

この種のレーザーでは, とくにガスの混合化, 流量, 圧力, 放電電流, 放電状態, 管壁温度の最適化および安定化を心がける必要がある.

##### 4.1 温度の安定化

Belland ら<sup>16</sup>は 2 重管の外側に温度制御したオイルを流し, N<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub> (1:2) の放電により 100°C で最大出力が得られ, 135°C で管壁へのポリマーの付着の起こらないことを見いだした (Vanderkooy ら<sup>18</sup>も付着量を少なくするには出力最適温度より高くする必要があるという結果を得た). さらに He の添加によって最大出力の得られる温度が上昇することも見いだした. 最適条件で, 長さ 2.42m, 直径 5 cm の導波管レーザーを用い, EH<sub>11</sub>

モード 337 μm で 90 mW (ビームスプリッターで出力を取り出して 100 mW) の安定動作を得た<sup>17</sup>. また DCN レーザーも同様にして 3.2m レーザー管を用いて 165°C で 194.70 μm に 250 mW の安定高出力<sup>20</sup>を得ている.

H<sub>2</sub>O レーザーでは電極付近の汚れ以外は HCN レーザーのような付着の問題はない. 20~120°C の範囲では管壁温度の低いほうが高出力であり, 長さ 3.2m, 直径 3cm の導波管レーザーを 20°C に水冷して H<sub>2</sub>O+H<sub>2</sub> 放電により, EH<sub>11</sub> モードの 118.8 μm 線で出力 52 mW, 安定度 2%/h が得られている<sup>21</sup>.

##### 4.2 放電の安定化

安定に放電させるためには一般に定電流電源を用い最適の放電安定抵抗を選ぶ. しかし, 遠赤外レーザー放電管は直径が 3~10 cm, 長さが 1.5~8 m と比較的大きく, その内部で複雑な化学反応も進行するため放電管全体にわたって均一な安定放電を得ることはかなりむずかしい. 最も重要なのは陰極 (形, 材質, 大きさ) であり, ほとんど円筒型が使われている. その利点<sup>28</sup>として, 円筒内・外面で電流が流れ, 電極面積が広くとれ, 円筒内での電荷発生効率がよいことなどがあげられる. 以前は山中ら<sup>29</sup>の真鍮製水冷ホローカソードが広く用いられたが, その後多くの改良が加えられた. Schötzen ら<sup>28</sup>は図 2 a のような水冷ホローカソードを作り, ステンレスチューブ内に放電を集め, エッジでのスパークをなくすようにした. Belland ら<sup>16,17,19,20</sup>はタンタル円筒の熱陰極を水冷アーム内に収め, HCN, DCN レーザーでよい結果を得た. 最近このタンタル熱陰極が多く用いら

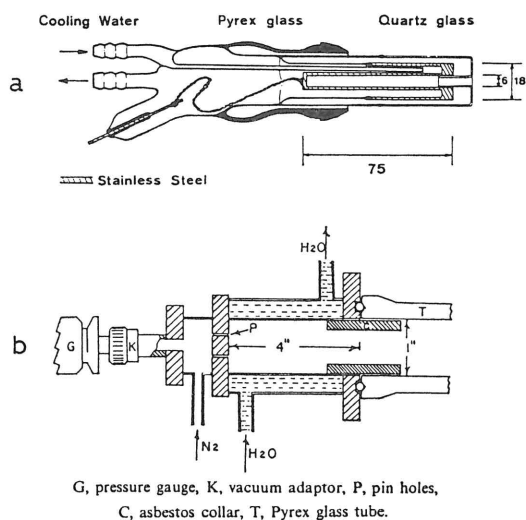


図 2 cw HCN レーザー用の陰極  
a: Schötzen らの陰極<sup>28</sup>, b: Vanderkooy らの陰極<sup>18</sup>

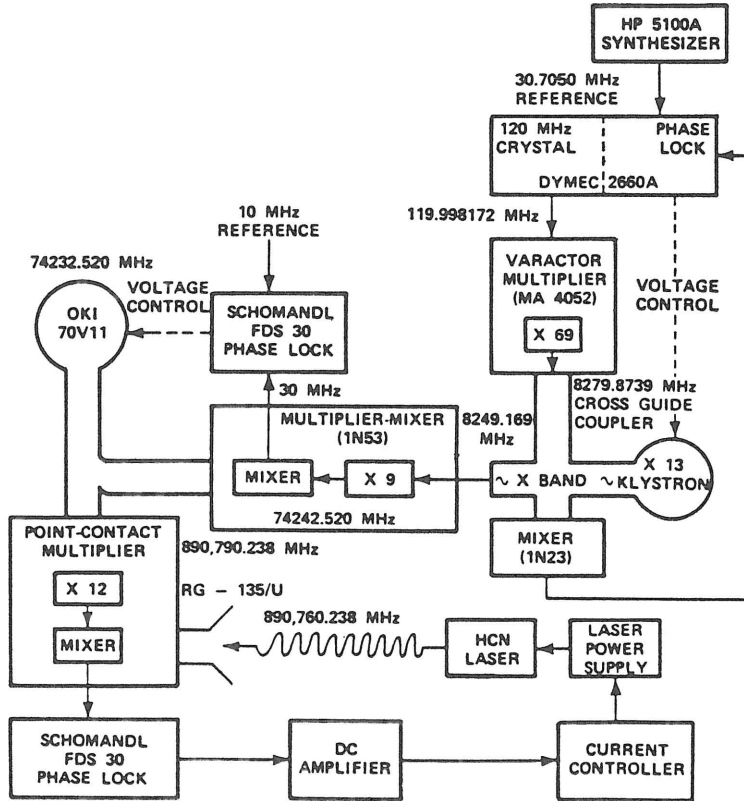


図3 890 GHz HCN レーザーの自動周波数制御およびフェーズロックシステム<sup>37)</sup>

れている。長時間動作させると陰極内面に黒色の固形物が見られ、カソードスポットが発生しやすく放電場所が移動することにより不安定になる。これに対して、Vanderkooy ら<sup>18)</sup>は図2bのような水冷ステンレス陰極をつくり、内部に N<sub>2</sub> ガスを噴出させ局所的な N<sub>2</sub> グロー放電により HCN 放電を邪魔することなく何時までもきれいな状態で使えるようにした。また H<sub>2</sub>O レーザー用としてはニオブの熱陰極がよいという報告<sup>21)</sup>がある。

cw HCN レーザーでは放電管全体にわたって安定な縞模様が見られる放電状態のとき出力が安定である(出力の最大とは一致しない)<sup>16, 19, 30, 31)</sup>。ところが cw H<sub>2</sub>O レーザーではこの縞模様がなく、陰極付近を除いて放電管全体が赤味を帯びた均一な放電のとき最適である<sup>21, 22)</sup>。

以上のように種々工夫がなされているが、まだ改良の余地が残っている。

4.3 レーザーの利得曲線を利用した安定化

レーザー共振器の一方の鏡を電歪素子(PZT)やスピーカーに取り付け、共振器長を小振幅変調することによってレーザーを周波数変調し、そのときの変調出力を位

相検出し利得曲線のピークに安定化する方法<sup>32, 33)</sup>および変調出力を整流し設定した出力に対する基準電圧との差を誤差信号として帰還制御する方法<sup>27)</sup>(図1のシステムで±2%/200 hの出力安定度を得ている)が用いられている。

4.4 自動周波数制御とフェーズロック

Corcoran ら<sup>30, 34)</sup>は 337 μm HCN レーザー線に対して、120 MHz 水晶発振器の高調波で Xバンドクライストロンをフェーズロックし、その高調波で 7 GHz クライストロンをフェーズロックして、その第 12 高調波と 890 GHz HCN レーザー出力を点接触ダイオードで混合し、IF ビート周波数を増幅し、周波数弁別器を通してレーザー共振器の PZT に帰還することによって自動周波数制御を行なった。そして数時間に対して 10 kHz 以内(10<sup>-8</sup>)の安定化に成功した。また、この方法で得た帰還信号で、電流制御回路を用いてレーザーの電流を制御し、マイクロ波の高調波にレーザー周波数をフェーズロックし、ビート信号の線幅を 50 Hz 以下にすることも成功した<sup>35-37)</sup>(図3)。そして短時間で 10<sup>-11</sup>、長時間で 0.5×10<sup>-12</sup> の周波数の安定度を得た。この方法は

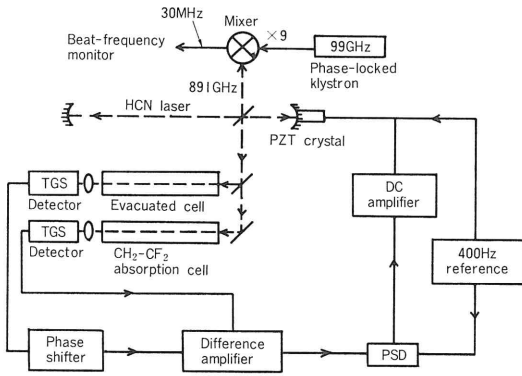


図 4 CH<sub>2</sub>=CF<sub>2</sub> の吸収線を利用した HCN レーザーの周波数の安定化<sup>41)</sup>

D<sub>2</sub>O レーザーでも行なわれている<sup>38,39)</sup>。これら遠赤外レーザーの自動周波数制御、フェーズロックの方法はレーザーに周波数変調を与えないで長時間、短時間ともに高精度で安定化でき、光周波数標準の研究、周波数の絶対値の測定に用いられている。

4.5 分子の吸収線を利用する方法

4.4 節の方法では安定化のために高価なマイクロ波装置を必要とするが、分子の吸収線を利用すればそのような装置を用いなくても高精度の周波数安定化が可能である。Bradley ら<sup>40,41)</sup>は CF<sub>2</sub>=CH<sub>2</sub> の吸収の中心が 337 μm HCN レーザー線の中心と 1 MHz 以内で一致することを見つけ、その吸収の中心に HCN レーザー周波数をロックし、数分間で 0.5~1×10<sup>-8</sup> の安定度を得た(図 4)。

4.6 ラムディップを利用した周波数の安定化

単一モードのレーザーの同調曲線の中心に現われる狭い均一幅のラムディップを用いると高精度の安定化ができる。Blaney ら<sup>42)</sup>は TEM<sub>00</sub> モードで発振する 28 μm H<sub>2</sub>O レーザーのラムディップを用いて、レーザーの中心周波数に安定化し、その周波数を ±0.3×10<sup>-9</sup> の精度で測定した。

5. 光励起遠赤外レーザーの安定化

光励起遠赤外レーザーは CO<sub>2</sub> レーザー励起が主であり、図 5 のように波長選択型 CO<sub>2</sub> レーザーと遠赤外レーザー共振器および励起光を効率よく遠赤外共振器に入射させる光学系で構成されている。遠赤外レーザー共振器内で (ν=0, J'') 状態にある分子が CO<sub>2</sub> レーザー光を吸収し、(ν=1, J') に振動回転励起され、ν=1 で J' と J'-1 の準位間に、ν=0 で J''+1 と J'' の間に反転分布ができ、さらにその分子が永久双極子モーメントを

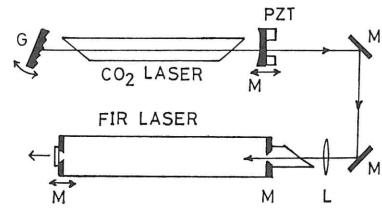


図 5 CO<sub>2</sub> レーザー励起遠赤外レーザー

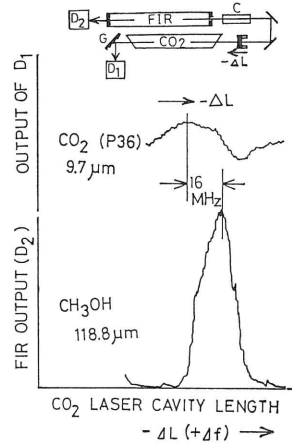


図 6 CO<sub>2</sub> レーザー共振器長を変化させたときの 9.7 μm P(36)CO<sub>2</sub> レーザーおよび 118.8 μm CH<sub>3</sub>OH レーザーの出力変化

もっていれば、その純回転遷移によるレーザー発振(その波長が遠赤外領域になる)が可能になる。このように光励起遠赤外レーザーは分子の吸収を利用するものであるからレーザー分子の吸収線が励起 CO<sub>2</sub> レーザーの利得幅内で一致する必要がある。ところが遠赤外レーザー分子の吸収線幅は CO<sub>2</sub> レーザーの利得幅より狭く、しかも吸収線の中心は CO<sub>2</sub> レーザー線の中心と一致せず同調曲線のスロープに位置することがほとんどである(図 6)。したがって、遠赤外レーザー出力の安定性は CO<sub>2</sub> レーザーの周波数および出力の安定性に強く依存する。図 6 からわかるように、CO<sub>2</sub> レーザーの周波数が数 MHz 変化することにより遠赤外レーザー出力が数十~50% 以上変化することも珍しくない。遠赤外レーザー出力を安定化するためには CO<sub>2</sub> レーザーをオフセット周波数で高精度の安定化をしなければならない。実際には遠赤外レーザー出力を最大にするように CO<sub>2</sub> レーザー周波数(共振器長)を制御する方法が多く用いられている。

5.1 CO<sub>2</sub> レーザー周波数を帰還制御する安定化

以下で述べるように帰還制御のための誤差信号をいろいろな方法で得て CO<sub>2</sub> レーザーの周波数を安定化して

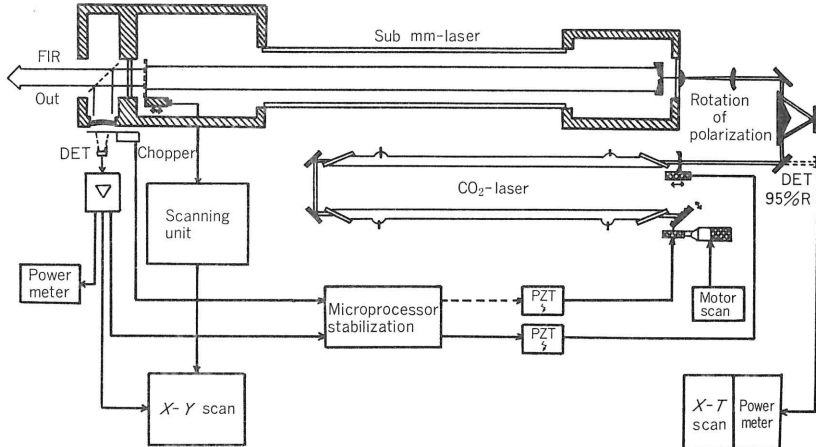


図7 CO<sub>2</sub> レーザー励起サブミリ波レーザーのマイクロプロセッサーを用いた安定化<sup>48)</sup>

いる。

5.1.1 レーザーの利得曲線を利用する方法

遠赤外レーザー分子の吸収の中心が CO<sub>2</sub> レーザー同調曲線のスロープに位置することを利用して、CO<sub>2</sub> レーザー同調曲線上の任意の周波数（通常は遠赤外レーザー出力が最大になる周波数を選ぶ）での出力を直流電圧に変換し、それと等しい基準電圧を設定し、出力変化に伴う誤差電圧をゼロにするように共振器長を帰還制御する方法<sup>43-45)</sup>がある。この方法は位相検出器を必要とせず、CO<sub>2</sub> レーザーに内部変調を与えないで比較的簡単な電子回路で安価に安定化できる利点をもっている。しかし、CO<sub>2</sub> レーザーの同調のピークでは安定化できないし、また、本質的に CO<sub>2</sub> レーザー周波数の安定化できないため遠赤外レーザーの安定化に対しては十分でない。

そこで、CO<sub>2</sub> レーザー共振器長（周波数）を変化させたときに得られる遠赤外レーザー出力曲線を利用する方法がよく用いられている。すなわち、遠赤外レーザー出力が最大となるところを中心に CO<sub>2</sub> レーザーを周波数変調し、そのときの遠赤外レーザーの変調出力を位相検出し、CO<sub>2</sub> レーザー共振器長を制御して安定化<sup>23,46,47)</sup>する。また、Wattenbach 氏<sup>48)</sup>はこの制御をマイクロプロセッサーで行ない（図7）、遠赤外レーザー出力に対して ±0.5%/数分、±1.2%/h（フリーランニング動作で ±10%/h）の安定度を、693 GHz HCOOH レーザー周波数に対して4時間のウォーミングアップ後約 200 kHz/h の安定度を得た。

5.1.2 プラズマのインピーダンス変化を利用する方法

CO<sub>2</sub> レーザー出力が変化すると放電管のインピーダ

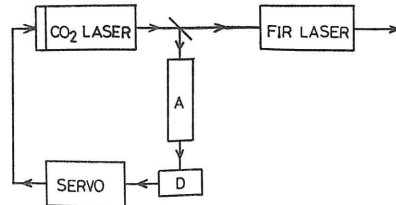


図8 励起用 CO<sub>2</sub> レーザーの安定化システム  
A: 吸収セルまたはスタルクセル, D: 検知器

ンスが変化することを利用する方法<sup>45,49-52)</sup>である。裏ら<sup>53)</sup>は励起用 CO<sub>2</sub> レーザーを安定化するのにこの方法を用い、共振器内にチョッパーを入れ、その開閉に同期した放電インピーダンスの変化を電圧で検出し、基準電圧と比較して誤差信号を得て、CO<sub>2</sub> レーザー共振器長を帰還制御し、±0.5%/h（周波数に換算して ±0.5 MHz/h）の安定度を得た。この方法は基準電圧を選ぶことによって遠赤外レーザー出力が最大となる CO<sub>2</sub> レーザー出力で安定化でき、CO<sub>2</sub> レーザー用の出力計を必要としない利点はあるが、周波数の安定化でない欠点をもっている。

5.1.3 遠赤外レーザー分子の吸収線を利用する方法

図8に示すように CO<sub>2</sub> レーザー共振器外に遠赤外レーザー分子と同じ分子を入れた吸収セルを置き、CO<sub>2</sub> レーザー周波数を変調し、吸収セルの透過光強度が最小になるように CO<sub>2</sub> レーザー共振器長を制御する方法<sup>54,55)</sup>である。Minguzzi 氏<sup>54)</sup>は CH<sub>3</sub>F の吸収の中心に 9 P(20) CO<sub>2</sub> レーザーを安定化し、長時間に対して 1% の安定度を得た。この方法の利点は CO<sub>2</sub> レーザーの周波数を遠赤外レーザー分子の吸収の中心にロックできることである。

### 5.1.4 スタルク変調を利用した安定化

Nussmeier ら<sup>56)</sup>はレーザー共振器の外に(たとえば図8のAに)  $\text{NH}_2\text{D}$  スタルクセルを置き, スタルク電極に DC 電圧を印加して 10P(20)  $\text{CO}_2$  レーザー線と  $\text{NH}_2\text{D}$  の吸収線を一致させ, さらに AC 電圧を重畳してスタルク変調し, 透過光強度の変化を位相検出して  $\text{CO}_2$  レーザー共振器長を制御し, 周波数を安定化させ,  $\pm 100$  kHz/2 h の安定度を得た. この方法は誤差信号を得るためにレーザーの内部変調を必要とせず, DC 電圧を変えることによってかなり広い範囲の任意の周波数で安定化できる利点をもっている.

筆者ら<sup>57-59)</sup>は, 118.8  $\mu\text{m}$   $\text{CH}_3\text{OH}$  レーザーを励起する 9P(36) cw  $\text{CO}_2$  レーザーの周波数を共振器外に置いた  $\text{CH}_3\text{OH}$  スタルクセル変調で安定化した. さらにその安定化した  $\text{CO}_2$  レーザーで  $\text{CH}_3\text{OH}$  を励起したとき, 118.8  $\mu\text{m}$  レーザー出力の安定度は(遠赤外レーザーはフリーランニング動作で)  $\pm 1.0\%/30\text{m}$  ( $\text{CO}_2$  レーザーをフリーランニング動作させた場合  $\pm 4.4\%/30\text{m}$ ) であり, 非常によく安定化できた. より高精度で安定化する方法として, スタルク変調で吸収線のラムディップに  $\text{CO}_2$  レーザーの周波数をロックする方法<sup>60)</sup>があり, 吉田ら<sup>61)</sup>が試みている.

### 5.1.5 光音響効果を利用する方法

セル中に封入された気体が光を吸収すると, 結果として気体の温度が上昇し圧力が増す. チョッパーを通して光を入射させるとセル内の圧力はチョッパー周波数で変化する. このときセル内にマイクロフォンがあれば, その変化は音として検出でき, 電圧信号で取り出せる. この光音響効果を利用して Busse ら<sup>62)</sup>は吸収気体に遠赤外レーザー分子 ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) を用いて, 9P(16)  $\text{CO}_2$  レーザーの周波数を安定化した. すなわち,  $\text{CO}_2$  レーザー共振器長を変調し, その周波数でマイクロフォン出力を検出して, その出力が最大となるように帰還制御する. この方法は検知器が安価なマイクロフォンであり, しかも遠赤外レーザー分子の吸収の中心に  $\text{CO}_2$  レーザー周波数をロックできる利点があり広く用いられている<sup>63, 64)</sup>. また, 彼ら<sup>65)</sup>は遠赤外レーザー管内数カ所にマイクロフォンを埋め込み, 励起光を効率よく遠赤外レーザー管内に導入するためのパワーモニターとしても用いている.

### 5.1.6 蛍光線ラムディップを利用する方法

低圧の  $\text{CO}_2$  を封入した吸収セルを  $\text{CO}_2$  レーザー共振器内に挿入すると,  $\text{CO}_2$  レーザーの強い定在波で励起され,  $00^01 \rightarrow 00^00$  遷移による 4.3  $\mu\text{m}$  蛍光線を出す. Freed ら<sup>66)</sup>はその蛍光線に見られる狭いラムディップに

$\text{CO}_2$  レーザーの周波数を安定化した. この方法で安定化した  $\text{CO}_2$  レーザーを用いて遠赤外レーザーを励起している例<sup>67, 68)</sup>もあるが, この方法はむしろ高精度周波数標準用レーザーの安定化に適しており, その目的に多く用いられている<sup>69)</sup>.

### 5.1.7 外部ファブリペローエタロンを用いる方法

Koepf ら<sup>70)</sup>は  $\text{CO}_2$  レーザー共振器外に置かれた機械的・熱的に安定なファブリペローエタロンに  $\text{CO}_2$  レーザー出力の一部を入射させ, エタロンを変調し, 透過光強度を位相検出して,  $\text{CO}_2$  レーザーの周波数をエタロンに安定化した. この方法は  $\text{CO}_2$  レーザーを内部変調する必要がなく, 任意の周波数で安定化できるが, 温度変化による影響を受けやすく, 長時間の安定化には問題がある.

## 5.2 遠赤外レーザー出力の安定化

5.1 節の方法で励起用  $\text{CO}_2$  レーザーの周波数を安定化しても, 遠赤外レーザーの共振器長を帰還制御しなければ, 温度変化や機械的振動による共振器長の変化に伴って遠赤外レーザー出力が変化する. 多くの場合, 数分から数十分に一度遠赤外レーザー共振器の長さを再調整しなければならない. したがって, 光励起遠赤外レーザーの出力を安定化するためには, 励起用  $\text{CO}_2$  レーザーの周波数を安定化するとともに, 遠赤外レーザー共振器の長さを帰還制御する必要がある.

Jirmann ら<sup>71)</sup>は  $\text{CO}_2$  レーザーと遠赤外レーザーと位相を  $90^\circ$  ずらせて変調し, 両方を安定化する機構と, 自動的に発振線を探る機構を備えた新しい遠赤外レーザーシステムを開発した.

筆者らは名古屋大学プラズマ研究所の共同研究で, プ

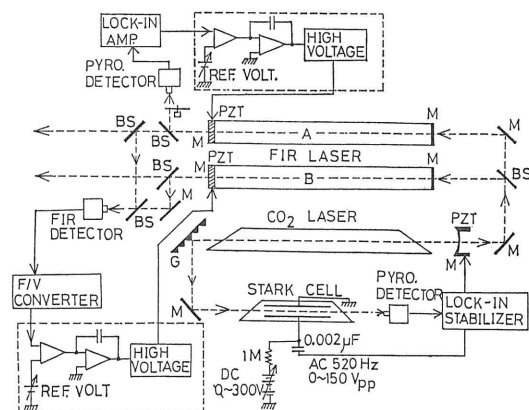


図9 2光束変調型レーザー干渉計用の9.7  $\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  レーザー励起双子型118.8  $\mu\text{m}$   $\text{CH}_3\text{OH}$  レーザーとその安定化システム<sup>58)</sup>



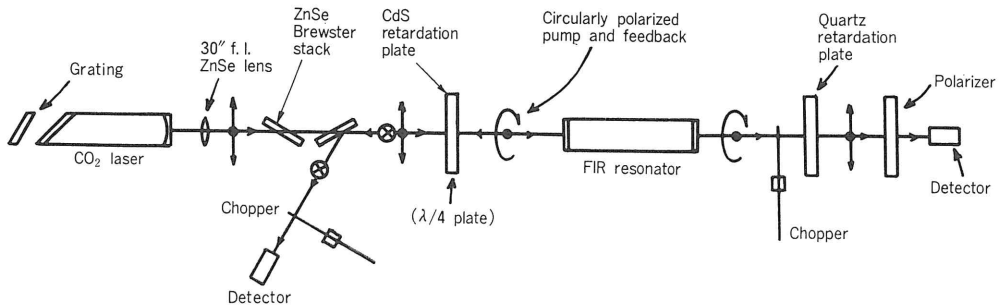


図 10 偏光を利用した光アイソレータ<sup>78)</sup>

ラズマの電子密度測定用の2光束変調型118.8  $\mu\text{m}$   $\text{CH}_3\text{OH}$  レーザー干渉計<sup>44,72)</sup>をメンテナンスフリーで使用できるようにする目的で、図9に示すシステムによりレーザーに内部変調をかけない方法で安定化した<sup>58,73)</sup>。すなわち、励起用の9P(36)  $\text{CO}_2$  レーザーは回折格子の0次光を用いて、 $\text{CH}_3\text{OH}$  スタルク変調により $\text{CH}_3\text{OH}$ の吸収の中心に周波数を安定化する。双子の118.8  $\mu\text{m}$   $\text{CH}_3\text{OH}$  レーザーは一方(A)の出力を同調曲線のスロープに安定化し、それに対して1 MHz離れた周波数にもう一方のレーザー(B)を安定化する。その結果、118.8  $\mu\text{m}$ の1 MHzヘテロダインビート周波数の長時間ドリフトを $\pm 10 \text{ kHz}/65 \text{ m}$ 以内にすることができた。

そのほか、遠赤外レーザーの安定化の方法として、4.25 THz (70  $\mu\text{m}$ )  $\text{CH}_3\text{OH}$  スタルクレーザーを安定な29.77 THzの10P(28)  $^{13}\text{CO}_2$  レーザーにフェーズロックした例<sup>74)</sup>や、注入ロックによる安定化を検討した報告<sup>75,76)</sup>等もある。

### 5.3 バックトーク対策

一般の光励起遠赤外レーザーは図5に示したように励起用  $\text{CO}_2$  レーザーと遠赤外レーザーの2組の共振器が光学的に結合されている。そのために励起  $\text{CO}_2$  レーザー光の遠赤外共振器から  $\text{CO}_2$  レーザー共振器へのフィードバック(バックトーク)が必ず存在する。このフィードバックにより  $\text{CO}_2$  レーザーの周波数が“引込み効果”で変化し、その結果、遠赤外レーザー出力が大きく変化する。したがって、光励起遠赤外レーザー出力を安定化する場合、このバックトーク対策が非常に重要である。報告されている対策は(a)幾何光学的方法と、(b)偏光を用いた方法に大別できる。

#### 5.3.1 幾何光学的方法

Hepnerら<sup>77)</sup>は遠赤外リングレーザーを用いることにより安定性を改善した。

Koepfら<sup>70)</sup>は励起  $\text{CO}_2$  レーザービームを遠赤外共振

器に斜め方向から入射させ、共振器内で7回反射する構造にし、反射光と入射光の光軸がずれるようにした。

#### 5.3.2 偏光を利用する方法

Mansfieldら<sup>78,79)</sup>は図10に示すように、励起用  $\text{CO}_2$  レーザービームをブルースター角のZnSe偏光子を通し、その後CdSの1/4波長板で円偏光にして遠赤外レーザー共振器に入射させる方法を用いた。このようにすると、遠赤外レーザー共振器からの反射光は円偏光のままであるから、もう一度1/4波長板を通ると、入射光に対して90°偏光方向の回転した直線偏光となりZnSeブルースター偏光子で反射され  $\text{CO}_2$  レーザー共振器内にもどらない。さらに彼ら<sup>80)</sup>は屋根型遠赤外レーザー共振器とブルースター偏光子を組み合わせた方法でもバックトークを除いている。

## 6. あとがき

放電励起遠赤外レーザーはcwで高出力発振する発振線が非常に少なく利用に対して波長の制限を受け、高出力動作の知られているHCN, DCNレーザーは管壁や鏡へのポリマーの付着もあり、長時間の安定動作およびメンテナンスの点でも問題が残っている。しかし、光励起遠赤外レーザーと違いレーザーが1本で済む簡便さがあり、かなり用いられている。波長が適当であることも関係するが、337  $\mu\text{m}$  HCNレーザーはプラズマ計測に対してよく用いられている。この種のレーザーの安定化は放電の安定化がとくに重要である。

光励起遠赤外レーザーは発振線の数も多く、利用に対して波長の選択が容易である。また高出力化も進み、cw 118.8  $\mu\text{m}$   $\text{CH}_3\text{OH}$  レーザーで750 mWの出力が報告<sup>81)</sup>されている。さらに、励起用  $\text{CO}_2$  レーザーの完成度も非常に高くなってきている。これらの状況から光励起遠赤外レーザーはかなり使いやすいレーザーになっている。この種のレーザーの安定化は、まずバックト

ク対策をし、次に励起用 CO<sub>2</sub> レーザーの周波数を遠赤外レーザー分子の吸収の中心に安定化し、さらに遠赤外レーザー共振器長を制御して出力の安定化を行なうのが最適である。また、操作性を向上させるために、レーザーの調整および安定化の自動化、すなわちコンピュータ制御が進んでくると考えられる。

本文中に述べたように、いろいろな安定化の方法が試みられ、実用されている。しかしながら、安定度の評価の方法は各論文で統一されていないし、たとえば時間領域での周波数の安定度に対して光周波数標準で用いられている評価法<sup>82)</sup> (アラン分散<sup>83)</sup>を用いた評価)を採用していない。今後は、遠赤外レーザーにおいても安定度の評価法を統一し、各安定化法を比較検討すべきであると考えている。

以上、大雑把ではあるが遠赤外ガスレーザーの安定化について述べた。遠赤外レーザーを利用する場合の参考になれば幸いである。

#### 文 献

- 1) A. Crocker, H. A. Gebbie, M. F. Kimmit and L. E. S. Mathias: *Nature*, **201** (1964) 250.
- 2) H. A. Gebbie, N. W. B. Stone and F. D. Findlay: *Nature*, **202** (1964) 685.
- 3) T. Y. Chang and T. J. Bridges: *Opt. Commun.*, **1** (1970) 423.
- 4) D. J. E. Knight: *Natl. Phys. Lab. Rep.*, **Qu. 45**, 6th issue (1981).
- 5) 網脇恵章, 山中正宣, 近 璋三: *レーザー研究*, **10**(1982) 78.
- 6) 山中正宣: *応用物理*, **49** (1980) 813.
- 7) 山中正宣, 網脇恵章: *O plus E*, No. 47 (1983) 109.
- 8) *Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 1-10 (Academic Press, New York, 1979-1984).
- 9) 山中正宣: 遠赤外域測定用レーザー光源に関する調査, 日本原子力研究所委託調査報告書 (1978).
- 10) 山中正宣: プラズマ計測におけるサブミリ波レーザーシステムの調査, 日本原子力研究所委託調査報告書 (1981).
- 11) 築島隆繁: *レーザー研究*, **7** (1979) 264.
- 12) 霜田光一: *応用物理*, **38** (1969) 306.
- 13) 田幸敏治: *応用物理*, **51** (1982) 465.
- 14) 田中敬一: *光学*, **11** (1982) 537.
- 15) J. P. Lesieur, M. C. Sexton and D. Véron: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **5** (1972) 1212.
- 16) P. Belland and D. Véron: *Opt. Commun.*, **9** (1973) 146.
- 17) P. Belland, D. Véron and L. B. Whitbourn: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **8** (1975) 2113.
- 18) J. Vanderkooy and C. S. Kang: *Infrared Phys.*, **16** (1976) 627.
- 19) J. L. Bruneau, P. Belland and D. Véron: *Opt. Commun.*, **24** (1978) 259.
- 20) D. Véron, P. Belland and M. J. Beccaria: *Infrared Phys.*, **18** (1978) 465.
- 21) P. Belland: *Appl. Phys. B: At. Mol. Phys.*, **B 27** (1982) 123.
- 22) A. Sentz: *Infrared Phys.*, **23** (1983) 9.
- 23) D. T. Hodges, F. B. Foote and R. D. Reel: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-13** (1977) 491.
- 24) D. Courtois, C. Thiebaux, A. Delahaigue, E. Merienne and P. Jouve: *Opt. Laser Technol.*, **13** (1981) 155.
- 25) D. D. Bičanić: *Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 7 (Academic Press, New York, 1983), p. 245.
- 26) K. Yoshihiro and C. Yamanouchi: *Rev. Sci. Instrum.*, **45** (1974) 767.
- 27) D. T. Llewellyn-Jones and M. D. James: *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **5** (1972) 468.
- 28) F. K. Kneubühl and Ch. Sturzenegger: *Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 3 (Academic Press, New York, 1980) p. 219.
- 29) M. Yamanaka and H. Yoshinaga: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **7** (1968) 250.
- 30) V. J. Corcoran, R. E. Cupp, W. T. Smith and J. J. Gallagher: *NASA Contractor Report*, NASA CR-1461 (1969).
- 31) J. S. Welles: *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-22** (1973) 113.
- 32) L. O. Hocker and A. Javan: *Phys. Lett.*, **26A** (1968) 255.
- 33) H. J. Cummins and P. G. Frayne: *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **15** (1982) 50.
- 34) V. J. Corcoran, R. E. Cupp and J. J. Gallagher: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-5** (1969) 424.
- 35) R. E. Cupp, V. J. Corcoran and J. J. Gallagher: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-6** (1970) 160.
- 36) R. E. Cupp, V. J. Corcoran and J. J. Gallagher: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-6** (1970) 241.
- 37) V. J. Corcoran, J. J. Gallagher and R. E. Cupp: *Proceedings of the Symposium on Submillimeter Waves* (Polytechnic Press, New York, 1970) p. 85.
- 38) Yu. S. Domnin, V. M. Tatarenkov and P. S. Shumyatskii: *Sov. J. Quantum Electron.*, **10** (1980) 116.
- 39) Yu. S. Domnin, N. B. Kosheljaevsky, V. M. Tatarenkov and P. S. Shumyatsky: *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-29** (1980) 264.
- 40) G. Duxbury, R. G. Jones, W. J. Burroughs, C. C. Bradley and N. W. B. Stone: *Proceedings of the Symposium on Submillimeter Waves* (Polytechnic Press, New York, 1970), p. 79.
- 41) C. C. Bradley and D. J. E. Knight: *Electron. Lett.*, **7** (1971) 381.
- 42) T. G. Blaney, C. C. Bradley, G. J. Edwards and D. J. E. Knight: *Phys. Lett.*, **43A** (1973) 471.
- 43) M. W. Lund, J. N. Cogan and J. A. Davis: *Rev. Sci. Instrum.*, **50** (1979) 791.
- 44) M. Yamanaka, Y. Takeda, S. Tanigawa, A. Nishizawa, N. Noda, J. Fujita, M. Takai, M. Shimobayashi, Y. Hayashi, T. Koizumi, K. Nagasaka, S. Okajima, Y. Tsunawaki and A. Nagashima: *Int. J. IR MM Waves*, **1** (1980) 57.
- 45) 岡島茂樹, 牧野真吾, 杉藤哲郎, 西沢章光, 山中正宣: *レーザー研究*, **11** (1983) 772.
- 46) J. M. Lourtioz, R. Adde, D. Bouchon and J. Pontnau: *Rev. Phys. Appl.*, **14** (1979) 323.
- 47) J. Prasad, D. N. Rao and P. N. Prasad: *Int. J. IR MM Waves*, **4** (1983) 15.
- 48) R. Wattenbach, H. P. Röser and G. V. Schlutz: *Int. J. IR MM Waves*, **3** (1982) 753.
- 49) M. L. Skolnick: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-6** (1970) 139.

- 50) W. H. Thomason and D. C. Elbers: *Rev. Sci. Instrum.*, **46** (1975) 409.
- 51) A. L. S. Smith and S. Moffatt: *Opt. Commun.*, **30** (1979) 213.
- 52) M. J. Kavaya, R. T. Menzies and U. P. Oppenheim: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982) 19.
- 53) 蓑 鐘石, 水野皓司, 小野昭一, 寒河江克己: *応用物理*, **51** (1982) 734.
- 54) P. Minguzzi and M. Tonelli: *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **10** (1977) 775.
- 55) G. Bionducci, M. Inguscio, A. Moretti and F. Strumia: *Infrared Phys.*, **19** (1979) 297.
- 56) T. A. Nussmeier and R. L. Abrams: *Appl. Phys. Lett.*, **25** (1974) 615.
- 57) A. Nishizawa, N. Noda, J. Fujita, M. Yamanaka, S. Okajima, S. Makino, M. Kondo, S. Kon, T. Koizumi, K. Nagasaka, Y. Tsunawaki, M. Takai and A. Nagashima: *IPP Nagoya Univ. Ann. Rev.*, April 1981-March 1982 (1982) 75.
- 58) S. Okajima, A. Nishizawa, M. Yamanaka, S. Makino, M. Kondo, T. Watanabe, A. Sugito, H. Hirose, S. Kon and J. Fujita: *Digest of 7th Int. Conf. IR MM Waves (Marseille, 1983)* p. 71.
- 59) S. Okajima, M. Yamanaka, A. Nishizawa, S. Makino, M. Kondo, S. Kon and J. Fujita: (to be published)
- 60) 山中正宣: *干渉計測振動除去に関する研究*, 日本原子力研究所委託研究報告書 (1980) p. 52.
- 61) 吉田智彦, 久場一樹, 阪井清美, 藤田 茂: *応用物理*, **53** (1984) 52.
- 62) G. Busse, E. Basel and A. Pfaller: *Appl. Phys.*, **12** (1977) 387.
- 63) G. Busse, R. Thurmaier and A. Hadni: *Infrared Phys.*, **19** (1979) 125.
- 64) J. M. Lourtioz, J. Pontnau and F. Julien: *Infrared Phys.*, **20** (1980) 231.
- 65) G. Busse and H. Schütz: *Infrared Phys.*, **19** (1979) 313.
- 66) C. Freed and A. Javan: *Appl. Phys. Lett.*, **17** (1970) 53.
- 67) J. Heppner and C. O. Weiss: *Opt. Commun.*, **21** (1977) 324.
- 68) J. Heppner, C. O. Weiss and P. Plainchamp: *Opt. Commun.*, **23** (1977) 381.
- 69) 黒沢富蔵, 小崎昭男, 櫻井慧雄, 田中敬一: *応用物理*, **46** (1977) 304.
- 70) G. A. Koepf, H. R. Fetterman and N. McAvoy: *Int. J. IR MM Waves*, **1** (1980) 597.
- 71) J. Jirmann, M. R. Schuster and G. Bauer: *Int. J. IR MM Waves*, **4** (1983) 311.
- 72) 西沢章光, 野田信明, 藤田順治, 山中正宣, 武田佳宏, 岡島茂樹, 牧野真吾, 長坂啓吾, 小泉俊郎, 高井正弘, 村上雄亮, 長島 章, 網脇恵章, 近 璋三, 近藤道雄, 仲田重範: *核融合研究*, **45** (1981) 476.
- 73) A. Nishizawa, T. Tetsuka, J. Fujita, M. Yamanaka, S. Okajima, A. Sugito, S. Kon, H. Hirose, T. Watanabe, T. Tsukishima, T. Sakai, K. Mizuno, K. Nagasaka, T. Koizumi, Y. Tsunawaki and M. Takai: *IPP Nagoya Univ. Ann. Rev.*, April 1982-March 1983 (1983) 62.
- 74) B. Dahmani and A. Clairon: *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-32** (1983) 150.
- 75) C. O. Weiss, E. Bava, A. De Marchi and A. Godone: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16** (1980) 498.
- 76) E. Bava, A. Godone and A. De Marchi: *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-29** (1980) 273.
- 77) J. Heppner and C. O. Weiss: *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1978) 590.
- 78) D. K. Mansfield, A. Semet and L. C. Johnson: *Appl. Phys. Lett.*, **37** (1980) 688.
- 79) D. K. Mansfield, G. J. Tesauro, L. C. Johnson and A. Semet: *Opt. Lett.*, **6** (1981) 230.
- 80) D. K. Mansfield, K. Jones, A. Semet and L. C. Johnson: *Appl. Phys. Lett.*, **40** (1982) 926.
- 81) D. K. Mansfield, L. C. Johnson and R. Chouinard: *Digest of 8th Int. Conf. IR MM Waves (Miami, 1983)* p. W5.4.
- 82) 秋元義明, 大井みさほ: *応用物理*, **47** (1978) 425.
- 83) D. W. Allan: *Proc. IEEE*, **54** (1966) 221.
- 84) *Reviews of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 2 (Plenum Press, New York, 1984).