

# 解説

## 周波数ひき寄せ現象を用いた二周波安定化レーザー

鈴木 範 人

大阪電気通信大学 〒572 寝屋川市初町 18-8

(1993年2月9日受理)

### Two Frequency Lasers Utilizing Frequency Pulling

Norihito SUZUKI

Osaka Electro-Communication University, 18-8, Hatsu-cho, Neyagawa 572

#### 1. はじめに

二周波レーザーを用いたヘテロダイン干渉計では光路差の波長以上の目盛は交流の周波数差, それ以下の細かい目盛は交流の位相差でつくることができるので都合のよい場合が多い。

光源の二周波レーザーは単一周波数レーザー光を2個の音響光学変調器(以下 AOM と書く)を用いてつくる場合と二周波を発振するレーザーを直接用いる場合がある。在来, 前者のレーザーとしては偏光安定化レーザーが, 後者としてはゼーマンレーザーが用いられて来たが, それぞれ不満足な点を持っている。偏光安定化 He-Ne レーザーは縦モード数の関係で共振器の長さが 25 cm (出力 2 mW) 以下のものしか得られず, その出力のうち半分は捨ててしまわなければならないという不満がある。またゼーマンレーザーについては二周波レーザー光の間のビート周波部が自由に選択できないことに関連した不満, さらに二周波それぞれの光の偏光は直交しているものとして使用するが磁場によって複雑な非直交性が発生しそのために不都合が生じる<sup>1)</sup>とか, 陰極に磁場が不均一にかかったとき, スパッタによるトラブルが発生するといった不満がある。

レーザーには周波数ひき寄せという現象がある。この現象を利用すると上記の不満の解消が可能となる。また在来は不可能とされていた, 単一偏光で5~6本の縦モードを持った高出力のレーザーの安定化も可能となる。周波数ひき寄せ現象は古くから知られているが, この現象が実用されるについては, 昔は高嶺の花であった高性能のマイクロ波のミキサー (DBM) が安価となり自

由に使えるようになったという背景がある。

ここでは以下, 周波数ひき寄せ現象の紹介を行い, 次いで AOM と組合すレーザーとして単一モードレーザーと多モードレーザーを取り挙げさらに直交する偏光を持つ二周波レーザーの紹介を行う。

#### 2. 周波数ひき寄せ現象

レーザー媒質中の光の伝播定数  $k'$  は

$$k' = k \left[ 1 + \frac{\chi'(\nu)}{2n^2} \right] - i \frac{k\chi''(\nu)}{2n^2} \quad (1)$$

で与えられる複素数である。 $\chi', \chi''$  は電気感受率の実数部と虚数部,  $k$  は真空中での光の伝播定数,  $n$  は吸収や増幅がない周波数領域における屈折率である。 $\chi', \chi''$  間にはクラマスキロニヒの関係

$$\chi'(\nu) = 2\chi''(\nu)(\nu_0 - \nu) / \Delta\nu \quad (2)$$

がある。 $\nu_0, \Delta\nu$  は利得曲線の極大値の周波数ならびに半値幅,  $\nu$  はレーザーの発振周波数である。一方, レーザー共振器の位相条件は, 共振器長を  $L$  として

$$kL[1 + \chi'(\nu)/2n^2] = m\pi \quad (3)$$

で与えられるが, 以上の式から

$$\begin{aligned} \nu &= \nu_m + (\nu_0 - \nu)\gamma(\nu)c/(\pi\Delta\nu) \\ &\sim \nu_m + (\nu_0 - \nu)\gamma(\nu_m)c/(\pi\Delta\nu) \end{aligned} \quad (4)$$

という関係が得られる。ここで

$$\nu_m = mc/2L \quad (5)$$

であり

$$\gamma(\nu_m) = -k\chi''(\nu_m)/(2n^2) \quad (6)$$

は利得曲線である。式(4)は, レーザー発振周波数  $\nu$  は共振器で決まる共振周波数  $\nu_m$  より  $\nu_0$  側に引きよせられることを表している。この現象を周波数ひき寄せとい

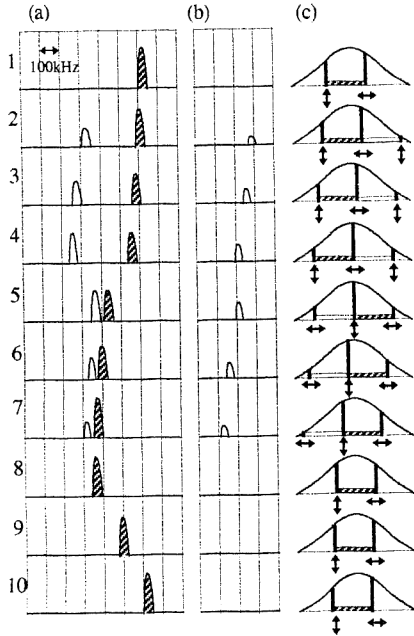


図1 2~3本の縦モードを有するレーザーの縦モード間光ビートのパワースペクトル観測値を用い、利得曲線をガウス形として作成した模式図。(a)600 MHz 付近、(b)1,200 MHz 付近、(c)発振スペクトルとその偏光。

う。

共振器長が変化し  $\nu_m$  が変化すると発振周波数はやや複雑に変化する。  $L=25\text{ cm}$  の He-Ne レーザーでのこの変化は光の周波数が  $4.7 \times 10^{14}\text{ Hz}$  に対し  $100\text{ kHz}$  程度である。縦モード間のビートスペクトルの変化の形でこの変化を発振器とミキサーで周波数を下げて観測した結果を模式的に図1に示す。(c)は縦モードの形の変化、(a)は  $C/2L \sim 600\text{ MHz}$  付近のスペクトルの変化、(b)はその倍の  $1,200\text{ MHz}$  付近のビートスペクトルである。ここでは  $\lambda/2$  の伸びに対応する一周期を10の位相ステップに分けて示している。(c)の矢印は偏光の方向を示している。ステップ4,5で偏光フリップが見られるが、これはこのレーザー管の特異体質によるものである。

### 3. AOM を併用した二周波レーザー

電子回路で取扱いやすい周波数差を得る方法の一つとして、レーザー光を二つの AOM で周波数シフトさせる方法がある。一つの AOM で例えば  $80\text{ MHz}$ 、他方で  $82\text{ MHz}$  のシフトを行って  $2\text{ MHz}$  の周波数差を有する二周波レーザーをつくる。

このように AOM を併用した二周波レーザーを用いたヘテロダイン干渉計は二つの特長を持っている。一つはビートが安定でビートの細かい位相変化を読みとりやすいという点、今一つの点は、戻り光に関する点である。元来、安定化レーザーは戻り光に対して非常に弱いものである。わずかな反射光でも共振器に再帰するとレーザー発振は乱れる。しかし戻り光の周波数がわずかもシフトするとその影響はなくなる。AOM を介しての戻り光は周波数がシフトしているので、その影響がないという点である。これはシステムがキャッツアイを形成してしまう際には都合がよい。

#### 3.1 単一モードレーザーを光源とする場合

ヘテロダイン干渉システムの光路差が大きい場合、レーザー光源としては単一モードの安定化レーザーを用いなければならない。光路差が大きく、非常にわずかの位相差を検出している例として、試料に半導体レーザー光を照射し、試料表面の光音響効果による変位をピコメータのスケールで検出した仕事がある<sup>2)</sup> (図2)。

在来、単一モード安定化レーザーは隣り合い、互いに直交した偏光を持つ二つのモードの光の強度が等しくなるよう共振器長を制御する偏光安定化方式であり、単一モードを得るため偏光子で片方のモードだけを取り出していた。したがって利用できる光のパワーは常に半分であった。

そこで、ほぼ全体のパワーを利用するための工夫がなされて来た。一般にピークの位置で制御を行うには変調という手段を用いるが、この場合はそれが許されない。無変調でピーク位置で制御する一つの方法として、図1(c)の位相ステップ3,4,5,6に見られる両端のスペクトルを、レーザー共振器の半分の光路差を持つ干渉計に入れると、左端のスペクトルによる干渉縞の暗部と、

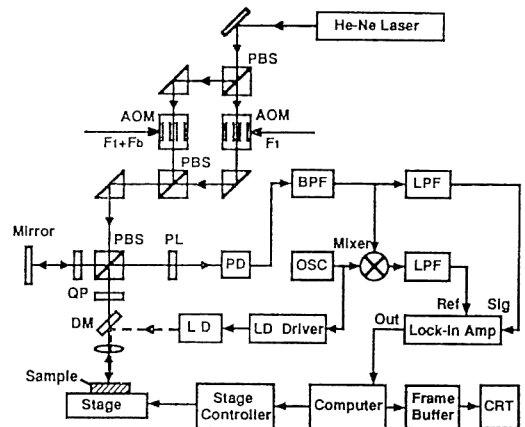


図2 光音響検知をレーザー干渉計で行うシステム

右端のスペクトルによる明部が正確に重なるため、両スペクトルの強度が等しい場合、干渉縞が消滅するという現象を利用して安定化を行い中央のスペクトルを使用する方法<sup>3)</sup>がある。この方法は、安定な光学干渉計を必要とするので高価であり実用的ではなかった。

ここで、周波数ひき寄せの現象を利用すれば、簡単に利得曲線のピークで発振を行う安定化レーザーをつくることができる。要は図1の位相ステップ5の場所で安定化すればよいわけで、そのためにビートスペクトル(b)に見られる 1,200 MHz のビートを用いるのも一案である。レーザー光をレーザーの固有偏光の方位と一致した方位を持つ偏光ビーム分割器 PBS で取り出すと縦モード間隔の2倍の周波数を持つ 1,200 MHz のビートスペクトルが現れたり消えたりする。このビートスペクトルの周波数はひき寄せのため 200 kHz 程の変化幅で変化するが、この周波数が一定になるよう、共振器長を制御すればよい。図3に示すごとく 1,200 MHz に近い安定した周波数の発振器を用意しその信号とビート信号をミキサーで掛け合わせ、二つの信号の差周波の成分のみを取り出すと 1,200 MHz のマイクロ波成分がなくなり 200 kHz の範囲で変化する交流信号だけを取り出すことができる。したがって、この交流信号の周波数-電圧変換を行い、適当なバイアス電圧を加算して、その値が一定になるよう、レーザー管の温度を制御すればよい。出力光としては制御に使ってない偏光を PBS でとり出せばよい。ミキサーの IF の出力は差周波成分の他に和周波成分を持っている。後者は不要であるが、これを放置せず、ハイパスフィルタで取り出しその電力を抵抗に吸収させた方がよい。ローパス、ハイパス両フィルタと抵抗を含む回路をダイプレキサーという。1,200 MHz の

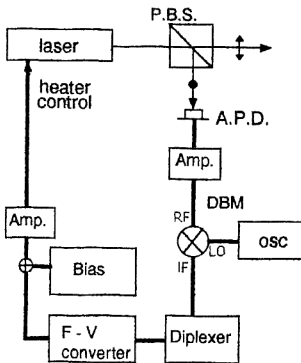


図3 利得曲線の最大部で発振を行う制御システム P.B.S.; 偏光ビーム分割器, A.P.D.; アバランシェフォトダイオード, DBM: ダブルバランスドミキサー。

安定な発振器は 60 MHz ほどの水晶発信器の信号を 20 通倍してつくればよい。

### 3.2 多モードレーザーを光源にする場合

光路差が小さい干渉計で、その微小な変化を知りたい場合がある。この場合、光源のスペクトルが接近した複数の線スペクトルであっても、各線のつくる干渉縞の明暗の位相が一致するので支障は生じない。ヘテロダイン干渉システムにおいても同様で、レーザーが多くの縦モード、スペクトル線を持ち、それぞれのスペクトル線が AOM でつくられる二周波レーザーになる場合、多くのスペクトル線がつくるビートの位相は一致するので、単一モードの場合と同様に扱える。ただここで、スペクトルの形状が変化するいわゆるモードホップが存在すると、雑音の増加の原因となり具合が悪い。一方、He-Ne レーザーで 2 mW 以上の出力を得ようとするとき共振長は 25 m 以上となり縦モードは 3 本以上となる。

光路差が小さいが、高出力のレーザーが望ましいという一例に原子間力顕微鏡 AFM がある。AFM では試料の原子と片持梁の先の原子の間の力による片持梁のたわみ量を測るのであるが、この片持梁の長さは小さく、ヘテロダイン干渉システムを構成した場合、光路差はわずかである。図4に一例を示す<sup>4)</sup>。ここでは He-Ne レーザーの光は BS<sub>1</sub> で二つの光路に分けられ、AOM 1 で 80 MHz, AOM 2 で 80.2 MHz の周波数シフトが与えられる。多モードであるので、数百 MHz の間隔で並んだ複数のスペクトルが 200 kHz の周波数差を持つ偏光が直交した二周波レーザーがつくられることになる。AOM 1 からの偏光は光ファイバーで導かれた後、平行光線となって PBS を通過し、特殊なレンズで片持梁の先端と付根に集光され、反射光は  $\lambda/4$  板で偏光方位が 90° 変えられ先端の反射光は検知器 PM<sub>1</sub> に付根の反射光は PM<sub>2</sub> に導かれると共に AOM 2 からの光と重ねられビートが求められる。この間の光路差が 200 kHz のビート信号の位相差を与えるようなヘテロダイン干渉計

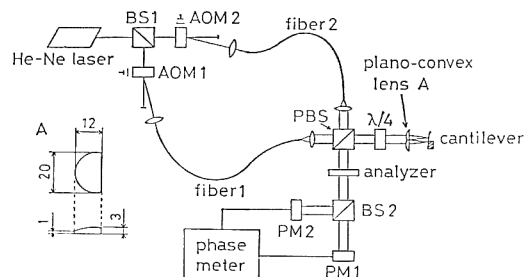


図4 原子間力顕微鏡におけるレーザー干渉システム Cantilever のたわみを干渉計で測定している。

になっている。

ここで用いられる He-Ne レーザーの出力は大きく、偏光方向が揃った 5~6 本の縦モードを持っている。このような多モードレーザーでは共振器長の変化に従って、周期的な変化を示す量を見つけることがむづかしく、安定化は極めて困難とされていた。例えば出力 10 mW のレーザーとして NEC (GLG 5400) を見ると、共振器長さが 45 cm であるが  $Ne^{20}$  と  $Ne^{22}$  を 1:1 で混合して利得曲線の幅を拡げて縦モードの数を多くして、共振器の変化に伴って生ずる縦モードスペクトルの形状の変化が出力強度の変動につながらないようにされている。また、共振器内にプリスタ板がおかれ単一偏光にされている。このレーザーの出力光の強度は、共振器長の変化に従って周期的に変化するが、その変化量は極めてわずかであり、この光量の変化量を手がかりとして安定化の制御を行うことは不可能に近い。ここでも周波数ひき寄せ現象を用いると安定化ができる。

このレーザーの共振器の縦モード間隔は約 344.2 MHz であるが、周波数ひき寄せにより、発振光の縦モード間隔は共振器の縦モード間隔からわずかにずれる。そして、このずれの量はそれぞれの縦モードによって異なるので、発振光のモード間のビートのスペクトルはやや複雑な変化を示す。スペクトルを観測し、その様子を模式化すると図 5 のようになる。モード間隔 340 MHz に対し周波数ひき寄せによる変化幅は高々 100 kHz である。そこで電子回路で取扱いやすい周波数を選びモード間隔周波数に加算あるいは減算した周波数の発振器を設け、ミキサで差周波 (IF) を求めると共振器長の  $\lambda/2$  の変化ごとに周期的に大きな変化を示す量が得られる。ビートスペクトルの中の強い線の周波数もそ

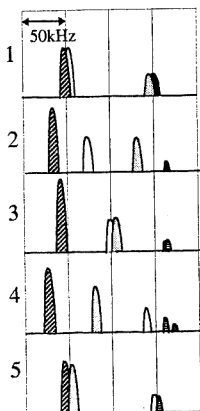


図 5 5~6本の縦モードを有するレーザーの縦モード間光ビートのパワースペクトル

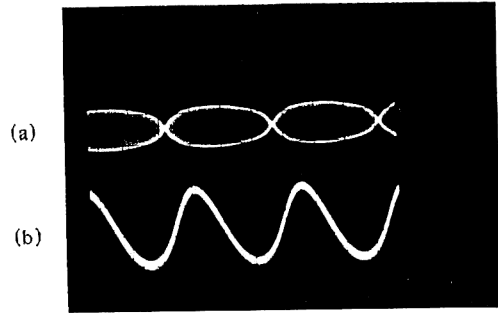


図 6 多モードレーザーの光ビートと発振を入力したときのミキサの出力波形 (a) とその包絡線 (b)

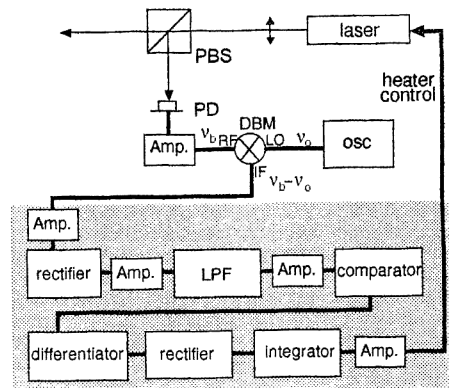


図 7 多モードレーザーの周波数安定化システム PD; ピンホトダイオード, OSC; この場合は 340 MHz の水晶発振器。

の一つであるが、強い 2 本の線の間で発生する線間のビートも使いやすい信号である。ミキサの IF 周波数を 800 kHz とした場合の IF の出力波形は図 6(a) のようになる。この図では 800 kHz の交流波形は写真の都合で消えており、その包絡線のみが見えている。包絡線が線間ビートでありこの周波数は DC 付近から 50 kHz 位の間で変化する。この線間ビートの変化を利用した安定化のための制御システムを図 7 に示す。直線偏光のビームのごく一部を方位が直交からわずかにずれた PBS で取り出し PIN ホト検知器で縦モード間ビートを検出し、57.4500 Hz の水晶の 6 通倍を行った 344.700 Hz の発振器との差間波信号をミキサで求めている。ミキサの IF 出力は包絡線を取り出すため整流検波された後、周波数-電圧の変換が行われ、この電圧が一定になるよう共振器長を制御している。

#### 4. 二周波を発振する He-Ne レーザー

直交した偏光で周波数の異なる発振を行うレーザーと

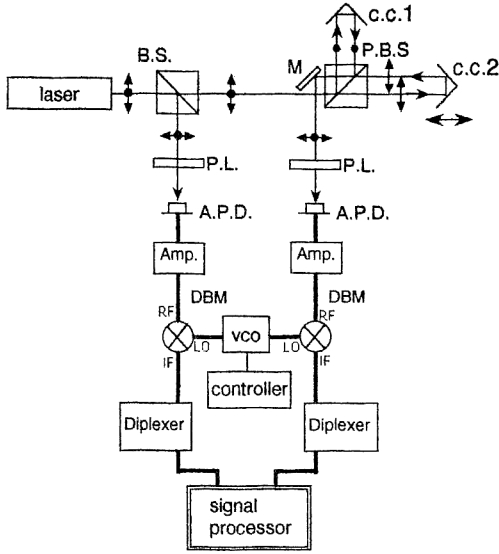


図 8 ヘテロダイン干渉測長システムの例

例えば、直ちにゼーマンレーザーと考えるのが常であるが、偏光安定形レーザーも元々直交した偏光で二周波発振光を持つレーザーである。ただ、二周波の周波数差が 600~1,200 MHz というマイクロ波領域にあるというだけである。この大きな周波数差は高精度のミキサーが自由に使用できる現在、干渉計測システムを構成する際障害になる要素はなく、むしろ有利な面を持っている。例えば図 8 のようなヘテロダイン干渉測長システムにおいて、共振器長が 25 cm の偏光安定化レーザーの両偏光を光源とすればビート周波数が 600 MHz のシステムが得られる。ここで、一つの発振器と二つのミキサーを用いることにすれば、そして発振器の周波数を可変にしておけば、ヘテロダインの信号周波数を 600 MHz から可聴周波数まで自由に選ぶことができ、また、被測定物が高速で動いているときは周波数を高くして、参照側と測定側の周波数差によって  $\lambda/2$  目盛で測り、被測定物が静止すれば両側の位相差で正確に位置決定を行うが、発振器の周波数を適当に変化させて、周波数差測定と位相差測定を全く別の周波数で行うことも可能である。ただし 600 MHz のビートの周波数変動幅は位相差測定時の低周波の交流の周波数よりも小さい必要がある。このレーザーとして在来存在する偏光安定形レーザーを用いることはできない。偏光安定形レーザーで、内部共振器形レーザーの二つの偏光、つまり隣り合ったモードの光の強度比が一定になるようにしても、縦モード間のビート周波数は決して一定にならないで、図 9 のように 100 kHz 前後の変動幅で不規則に変動するからである。

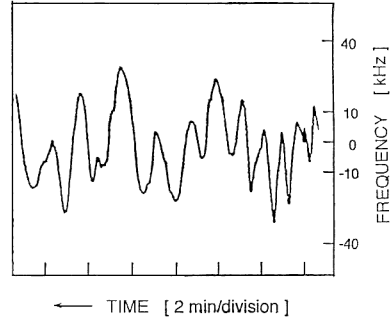


図 9 従来の偏光強度を用いた安定化レーザーのモード間ビート周波数の変動

周波数ひき寄せ現象を用いるとこの変動がない安定化レーザーをつくることのできる。前の図 1 の位相ステップ 8, 9 に固定すればよく、600 MHz 付近のモード間ビートを一本にし、このスペクトルの周波数を一定にすればよいのであるが、この縦モード間ビートの安定度は可能なかぎりの手段を用いて高くすることが望まれる。このような考えでつくられた制御システムを図 10 に示す。制御にレーザーの後方の光が使われている。方位 45° の偏光子を通った光はプラスチックファイバーで検知器 APD に導かれる。縦モード間ビートと、50.5830 MHz の水晶を 12 倍通して得られる 609.966 MHz の発振器の周波数差を持つ信号がミキサーおよびダイプレキサで求められる。共振器の伸びによって  $\nu_m$  そのものも変化する。室温と制御に適した温度の間では  $\nu_m = C/2L$  に 50 kHz くらいの差がある。上の発振器の周波数はこの変化も見込み 39 kHz のオフセットを持つよう決定されたものである。制御された後のモード間周波数は

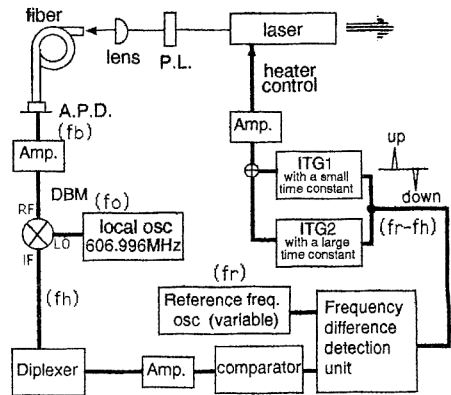


図 10 2モードとなるようモード間ビート周波数を一定とする安定化レーザーの制御システム  
制御にはレーザーの後方の光がプラスチックファイバーで APD に導かれている。

609.966 MHz + 39 kHz に設定されることになる。設定が完了していない時点ではダイプレキサの出力周波数は 39 kHz 前後で動いている。この出力はコンパレータで方形波にされ、別にもうけた 39 kHz の方形波信号との間の周波数差が求められ、その後で差が正であれば正極性のパルス、差が負であれば負極性のパルスをつくる回路で正負パルスがつくられ、比例制御の積分器 ITG 1 で電圧に変換され、この電圧にバイアス電圧が加算されて共振器長が制御される。積分器 ITG 2 は極めて大きい時定数を有する積分器で、正負のパルスの頻度が完全に一致しない限り積分結果はゆっくり変化する。この変化量が前記のバイアス電圧に加えられ、バイアス電圧の変化はパルスの頻度が完全に一致すれば止る。

このシステムでは、光ビート周波数のゆらぎは、水晶発振器の精度で決まる。つまり、光ビートと水晶発振器の信号はミキサーで周波数差が求められているので、この例における 39 kHz という制御信号周波数のゆらぎ幅は、600 MHz というビートのゆらぎ幅である。発振器の誤差は  $10^{-6}$  であり、この例でのゆらぎは 500 Hz である。これは、このレーザーを光源としてヘテロダイン干渉計を構成したとき、例えば位相差測定感度を上げるため VCO とミキサーを用い kHz 近傍まで周波数を落しても問題はないということを示している。

このレーザーには一つの困難がある。偏光安定形レーザーでは共振器長の  $\lambda/2$  の変化に対し、偏光強度の変化の波形はひと山あるだけであり、制御開始のスイッチは山の片方の斜面で行えばよかつたのであるが、図 1 からわかるとおりこのレーザーの 39 kHz 近傍の周波数変化は複雑であり、制御スイッチの投入のタイミングの決定は非常にむづかしい。この投入を自動的に行うには、一見無駄なようではあるが、偏光安定形システムを付加しておき、まず、偏光安定形レーザーとして安定させ、次にその安定点が縦モード間ビート周波数が目標値の近傍にくるよう安定点の修正を行い最後に本系列のシステムの動作を開始するという手順を踏むのも一案である。

内部共振器形のレーザーの偏光はほぼ直交楕円偏光である。したがってこの二つの偏光を PBS で分割して使うと相当大きなクロストークが残る。そこで位相子を用いて補正を行うと二つの偏光のうち一方は完全な直線偏光になるが、他方は楕円の形が残るし、この楕円の長軸は今一つの直線偏光の方位と必ずしも直交していない。したがってクロストークに対する対策は必要である。今干渉計において固定鏡に向う光を決める偏光子の方位を完全な直線偏光と一致させ、移動鏡の偏光子の方位を前

者と直交させたとすると、移動鏡へ向う光をカットしてもビートが観測される。この交流信号がクロストークであるが、この信号はヘテロダイン信号と同じ周波数であり一定振幅ならびに一定位相を持っているので、信号処理回路でキャンセルすることが可能である。位相は検知器の位置を変えて調整してもよいし、電気回路で調整してもよい。このクロストークはゼーマンレーザーの複雑なクロストーク（横ゼーマンレーザーではビートの倍の周波数成分が残る）に比して単純であるので処理が容易である。

## 5. おわりに

移動電話等 1 GHz 前後の通信器の普及によって、高性能のミキサーが自由に使える世の中になり、He-Ne レーザーを使ったヘテロダイン干渉やレーザーの制御にもこの電気部品を活用すればどうなるかということで、3種類ミキサーを使ったレーザーを並べて紹介した。現実の He-Ne レーザーにかかわるマイクロ波は、たまたま通信に使われている周波数の谷間になっている。これは通信の電波との相互干渉がないということもあるが、VCO 等の入手に対しては多少の苦勞がある。しかし高価ではあるが、T05 型の小型のものも市販されている。マイクロ波を基本波とするヘテロダイン干渉計では VCO の活用は大切であると思う。例えば、測長器での被測定物の移動速度によるドップラシフトは高々数 MHz であるが、この周波数変化というのは基本波の 1% にもならないので PLL を用いて変化を追いかけることも容易である。つまり、周波数が自由に変えられる二周波レーザー光が得られるミキサー、PLL を活用したヘテロダインシステムが多方面で活躍してほしいと思っている。

## 文 献

- 1) Y. Xie and Y. Wu: "Elliptical polarization and nonorthogonality of stabilized Zeeman laser output," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 2043.
- 2) S. Sumie, H. Takamatsu, H. Tsunki, Y. Nishimoto and Y. Nakai: "Evaluation of semiconductor lattice damage using a newly-developed photodisplacement laser probe," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **236** (1992) 241.
- 3) T. Araki, Y. Nakajima and N. Suzuki: "Frequency and intensity stabilization of high output power, internalmirror He-Ne laser using interferometry," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 1525.
- 4) T. Oshio, N. Nakatani, Y. Sakai, N. Suzuki and T. Kataoka: "Atomic force microscope detection system using an optical fiber heterodyne interferometer free from external disturbances," *Ultramicroscopy*, **42-44** (1992) 310.