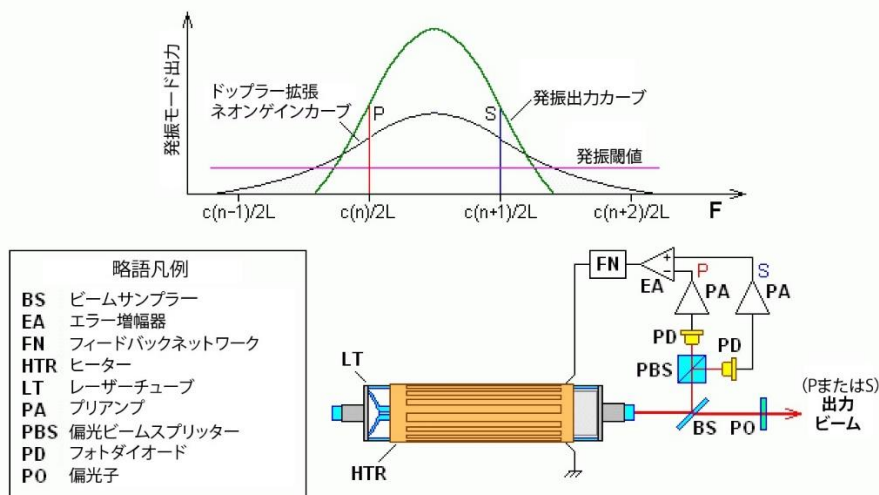


②⑤: 安定化単一周波数 HeNe レーザー

よく見かける赤色 (633nm) HeNe レーザーは、高い単色性を示す一方で、光の単一周波数(あるいは同等の波長)では出力しません。「動作の縦モード」の節で触れたように、数本の短い間隔で位置する周波数が一般的に同時に活発であり、それぞれの精細な数値と強度は長時間に亘って変化します。多くのアプリケーションではこれは問題とはなりません。ただし、他のアプリケーションではこうしたレーザーは不要とみなされます。 [Sam's Laser FAQ - Helium-Neon Lasers \(donklipstein.com\)](http://www.donklipstein.com/Sam's%20Laser%20FAQ%20-%20Helium-Neon%20Lasers)

(6) 例えば\$5,000 あれば、何日にも亘る保証仕様のある単一周波数で出力し、かつそれが広い温度範囲に亘って変化もしない赤色 (633nm) HeNe レーザーを購入することができます。こうした HeNe レーザーの動作は基本的にバーコードスキャナーと同じ(そして実際に同一モデルの HeNe レーザーチューブの場合もあります!)である一方、モードスイープを排除し、かつ単一の出力周波数を選択するために、いくつか追加の強化策が必要となります。単純に低熱膨張素材でレーザーキャビティを構築することでは、光の波長の何分の一かの距離を扱うには十分ではありません! 能動的なフィードバックが必要となります。(10) こうしたレーザーで最も共通する実装は、せいぜい 3 本の縦モードだけで発振する短い赤色 (632.8nm) チューブから始まります。(技術的な理由から、他の可視および赤外 HeNe 波長の安定化レーザーは、実装がより困難でずっとめずらしいものとなります。詳細は下記にて。)それから光フィードバックを加え、発振波長の約 1/2 の範囲でミラー間の距離を調整し、縦モードが HeNe ゲインカーブ上の特定の位置で保持されるようにします。



2 モード安定化単一周波数HeNeレーザー

この調整を最も頻繁に行うのは加熱コイル(チューブの内部か外部で)ですが、ピエゾ結晶トランスデューサー(ピエゾ機構、デジタル腕時計のブザー素材の高価な機種)も使用されることがあります。ピエゾ機構は、システムが安定する時間をヒーターの場合の最高 30 分と比較して、数秒まで減らします。しかし、連続的に点灯したままにしておくレーザーの場合、これはおそらく問題とはなりません。一部のレーザーはヒーターに加えてピエゾ結晶ファンなどの冷却装置を使用して、レーザーがより広い温度範囲上で安定して稼働することを可能にします。そして Melles Griot 社製 05-STP-909/910/911/912(元々 Aerotech Syncrolase 社製 100 レーザーに基づく)を含む少数の安定化レーザーは、HR ミラー(高反射率ミラー)マウントを取り囲む小型の RF(高周波)誘導ヒーター(現在の IH 機構)を使用して、チューブ全体では

なく、調整距離だけを制御します。こうしたわずかな体積への直接の加熱により、反応は非常に高速となります。この機構は、チューブ全体用のヒーターよりもコンパクトな筐体をもたらすことになります。



Aerotech Syncrolase 社製 100 安定化レーザー



Melles Griot 社製 05STP910/912 安定化レーザー

(21) 多くの機構がよく機能し、それらの高額な値札を考慮すると、これらは本当にどれほど不当であるかに驚かされます！ 😊 通常の余剰 HeNe レーザーチューブと少数のがらくた部品から、完全に使用可能なシステムを構築することは容易です。

よく見かける技術が下に挙げてあります：

安定化技術の種別	変動精度	
標準（マルチモード） HeNe レーザー	---	---
安定化機構無しのシングルモード	1.5 GHz	3×10^{-6}
シングルモード強度安定化	10 MHz	2×10^{-8}
ラムディップ安定化	5 MHz	1×10^{-8}
ゲインピーク安定化	5 MHz	1×10^{-8}
2 モード偏光安定化	1 MHz	2×10^{-9}
二次ビート安定化	200 kHz	4×10^{-10}
ゼーマンビート（うなり）周波数安定化	100 kHz	2×10^{-10}
外部参照（ヨウ素）セル安定化	<5 kHz	1×10^{-11}
外部参照（ファブリーペロー共振器）安定化	<1 Hz	1×10^{-14}

(37) 留意すべきは、レーザーキャビティ内でエタロンを使用して単一縦モードを選択することもできるということです。長いチューブで多くのモードを維持する必要のある高出力レーザーの場合、ミラー間隔全体とエタロンへのフィードバック制御の両方が必要となるでしょう。しかし、低出力レーザー（例えば 1mW～3mW）の場合、基本的なフィードバック制御と連動する短いチューブを使用してのモード数制限は、遥かに複雑ではなく、低価格の手法となります。

エタロンフィルタ

透過率

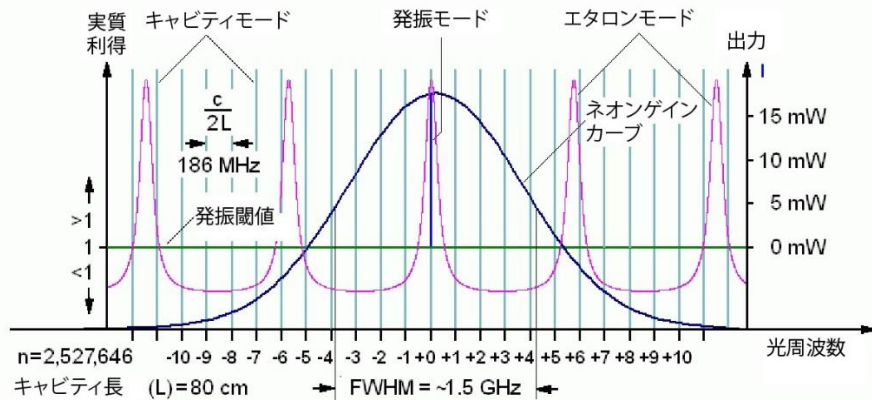
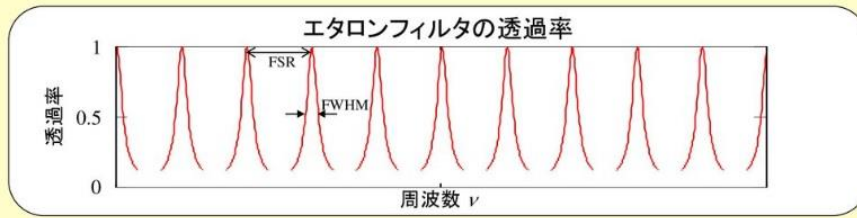
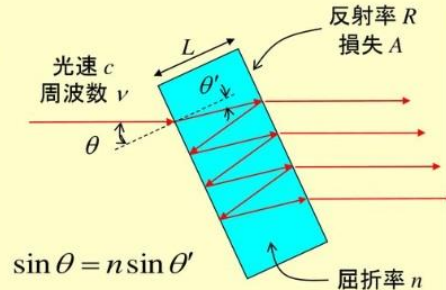
$$T(\nu) = \frac{(1 - A - R)^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2 \left(\frac{2\pi L \nu}{c} \cos \theta' \right)}$$

共振周波数間隔(Free Spectral Range)

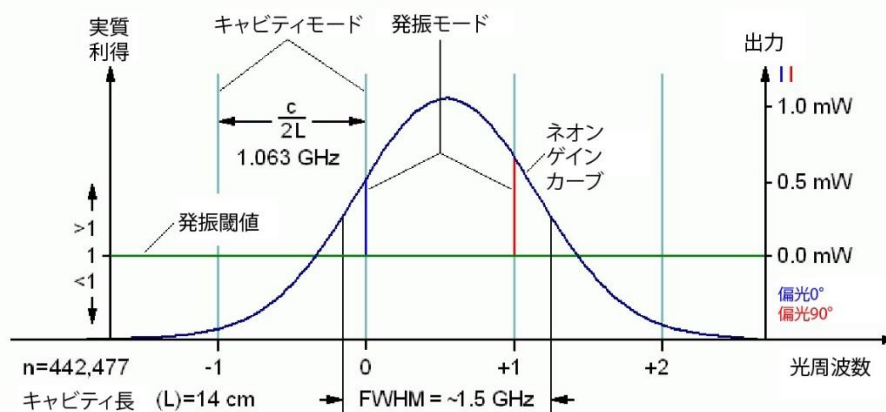
$$\text{FSR} = \frac{c}{2nL \cos \theta'}$$

鋭さ(finesse)

$$f = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}}$$



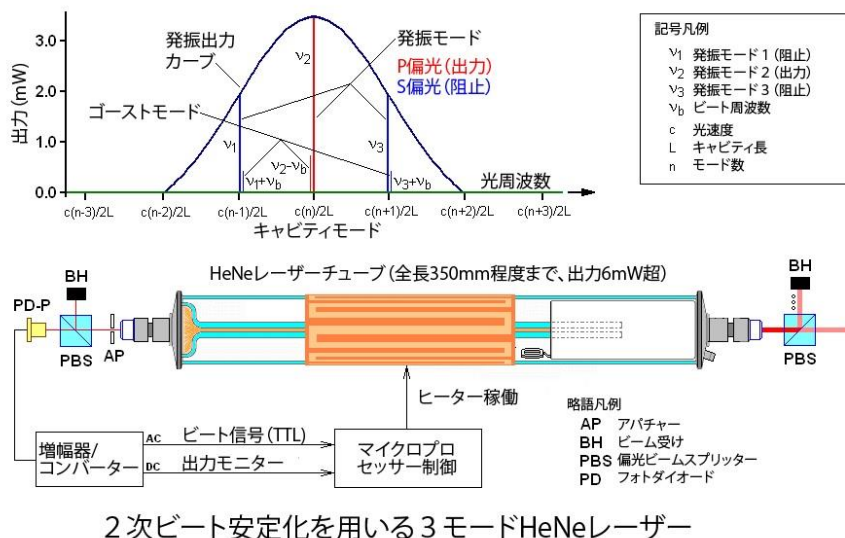
シングルモードHeNeレーザーでの発振線選択用のキャビティ内エタロン



典型的なランダム偏光1mW HeNeレーザーの縦モード

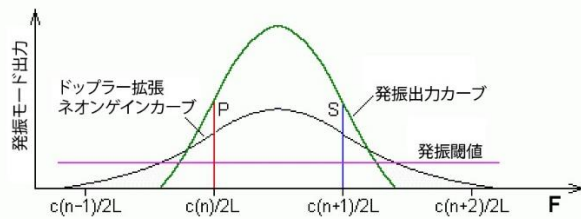
(40) 安定化レーザー(あるいはある程度の精度で制御する必要があるもの)は2つのタイプに分類できます。装置を制御するために使用するものがその構造の基本的な特性であれば、その技術は「内因性(基本的に内部参照から得られ

るもの)であり、レーザー物理学が当てはまります。何らかの外部の参照が使用される場合は「外因性」です。ほとんどの商用の安定化 HeNe レーザーは最初のタイプであり、その理由は、それらが周知でありかつ本質的に固定されている周波数/波長と、電磁波スペクトルによるネオンゲインカーブの形状を利用するからです。追加の技術を用いて不確実性をさらに減らす場合もあります。

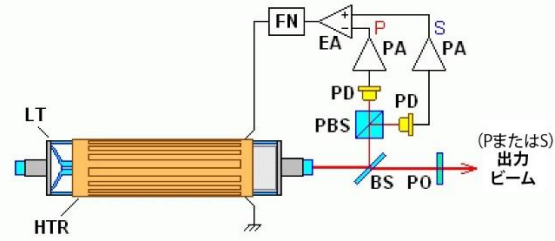


(45) 殆どの通常の商用安定化 HeNe レーザーは 633nm の赤色で、その理由の一部は 2mW 未満の単一周波数出力を持つすべての利用可能な HeNe 波長にあります。こうしたシステムは比較的実装が容易で、一般に広範囲のアプリケーションで有用です。技術手法は通常 2 つの下位クラスのどちらかに分類されます：

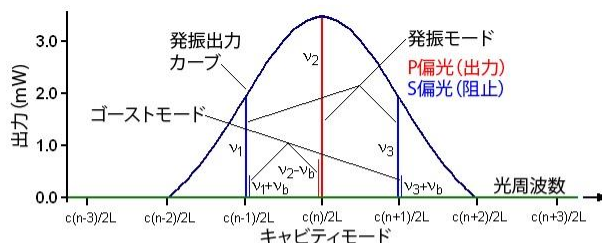
- 1 本か 2 本のモードによる安定化システム：(49) これらは、同時に少数のモードだけが発振するのに十分な短さを持つランダム偏光の HeNe レーザーチューブを使用します。ランダム偏光の HeNe レーザーチューブの隣接するモードは、ほとんど常に直交偏光となります。そのため、2 本のモードが発振しているところでは、それぞれのモードの強度に対応する別個の信号を偏光ビームスプリッターで分離して、1 対のフォトダイオードを介して容易に得ることができます。(チューブが直交偏光ではない、あるいは奇妙に振る舞うモードを持つ場合、それは別のアプリケーションでの再利用か、ごみ箱へとリサイクルされます。)信号はレーザーの HR ミラー(高反射率ミラー)からの不要ビーム、あるいは出射ビームの 1 部をサンプリングすることによって入手することができます。片方あるいは両方のフォトダイオード信号を、強度安定性あるいは周波数安定性のどちらを重要とするかに応じてフィードバックループとして使用します。留意すべきは、一部の条件下では、こうした目的で使用されるチューブ内で、最高 3 本あるいは 4 本のモードが許容される場合もあるということです。詳細は下記。



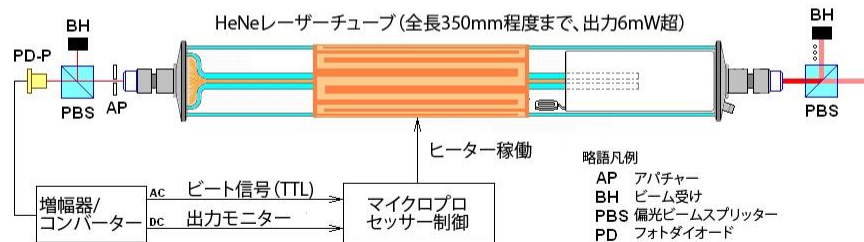
略語凡例	
BS	ビームサンプラー
EA	エラー増幅器
FN	フィードバックネットワーク
HTR	ヒーター
LT	レーザーチューブ
PA	プリアンプ
PBS	偏光ビームスプリッター
PD	フォトダイオード
P0	偏光子



2モード安定化単一周波数HeNeレーザー



記号凡例	
v_1	発振モード1 (阻止)
v_2	発振モード2 (出力)
v_3	発振モード3 (阻止)
v_b	ビート周波数
c	光速度
L	キャビティ長
n	モード数



2次ビート安定化を用いる3モードHeNeレーザー

- (57) 最良の周波数安定性が必要となる場合、モード信号比率(通常 1:1)がフィードバックループで使用されます。これが絶対の周波数安定性をもたらす理由は、チューブの温度上昇に伴って変化したり使用期間の増加に依っても変化してしまう可能性を持つ実際の出力から、この比率が独立しているからです。1:1 の比率で、2本のモードはゲインカーブのそれぞれの側で等しい間隔を持って静止します。(2モード安定化単一周波数 HeNe レーザーの機構図を参照。) 1本のモードがゲインカーブの中心(中央の1本が強く両側の2本が弱い場合)の近くにあつてチューブが3本のモードで発振する場合でも、安定するときは2本のモードだけとなります。全体の手法は「2モード単一周波数安定化 HeNe レーザー」で示されます。商用製品の例には、Coherent 社製 200 レーザー、Spectra-Physics 社製 117/A/B/C (そして同一の Melles Griot 社製 05-STP-901)、REO 社製 SHL、Axsys / Teletrac 社製 150 やその他多くのものが含まれます。



Coherent 社製 200 安定化レーザー



Spectra Physics 社製 117 安定化レーザー



Melles Griot 社製 05STP901 安定化レーザー



REO 社製 安定化レーザー



Axsys / Teletrac 社製 150 安定化レーザー

(63) 一部の高価ではない(これは相対的です！)安定化 HeNe レーザーだけが、シングルモードを用いて周波数ロックを行います。(ネオンゲインカーブの)スロープ上では、ウォームアップ後に出力が均衡に達した途端、合理的に安定するでしょう。

- 偏光出力で最良の強度安定性が必要とされる場合、シングルモード(1つのフォトダイオードチャンネル)からの信号が参照電圧と比較され、これがフィードバックループでのエラー信号となり、そのモードをゲインカーブの中央近くに移動させます。たとえチューブがゲインカーブのそれぞれの側に2本ずつ最高4本のモードで発振するとしても、安定時には1本はゲインカーブの中心近くにあり、ゲインカーブの両端に2本のより弱いモードがあることになるでしょう。これらの(弱いモード)は主要な中央部にあるモードに対して直交して偏光されるため、出力側の偏光子で阻止できます。全体的な手法は「シングルモード単一周波数安定化 HeNe レーザー」を参照。商用製品の例には、Spectra-Physics 社製 117A (そして同一の Melles Griot 社製 05-STP-901)と REO 社製 SHL が含まれます。

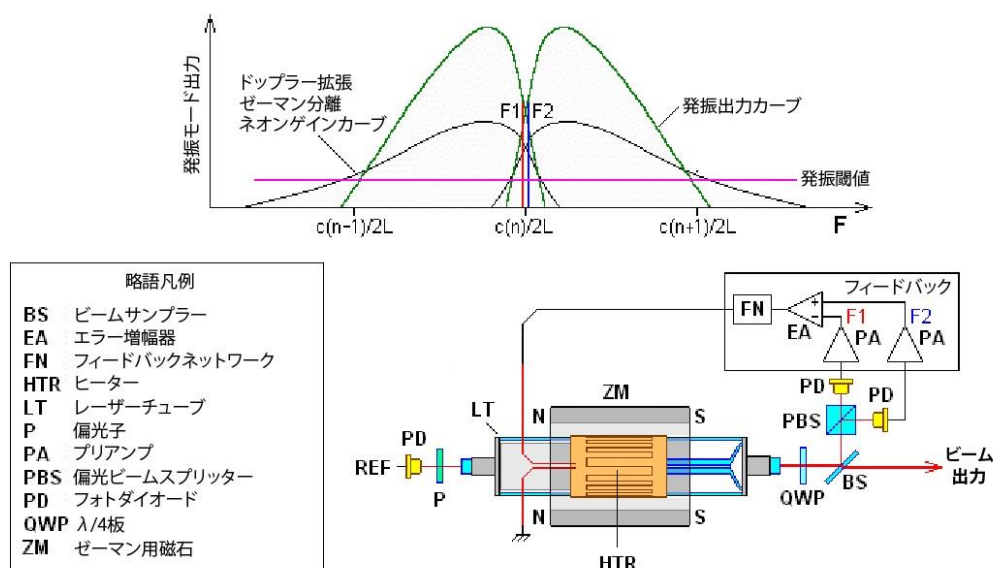


Spectra Physics 社製 117A 安定化レーザー

- (70) 全体出力(偏光に関係なく)で最良の強度安定性が必要とされる場合は、非偏光ビームサンプラーを使用するか、2つのフォトダイオードチャンネルからの信号を合計し、参照値と比較します。この手法を用いる商用レーザーを私は知りません。

2. **ゼーマン分離システム**: 磁場を用いて比較的小さい周波数の差を持つ1対の発振モードを作り出します。ゼーマン周波数差に伴う安定した光周波数をいろいろな距離測定アプリケーションに使用します。これらは磁場の方向に依って同軸方式か横方向方式に分類できます:

- **同軸**: 上述のシングルモードシステムのように、チューブ長は1本だけの縦モードが発振する長さです。ただし、強力な同軸の磁場がこのシングルモードを2つのサブモードに分離し、それぞれが逆方向に回転する円形の偏光状態を生み出します。出力側にある偏光子を通過する際に、これが数百 kHz~数 MHz(磁場強度および他の要素に依る)のビート周波数を生み出し、それを用いて安定化フィードバック信号を獲得し、それがこの目的のために設計されている計測技術の鍵ともなります。全体的な手法は「2モード安定化軸ゼーマン分離 2 周波数 HeNe レーザー」を参照(下図)。商用製品の例には、HP/Agilent 社製 5501B, 5517, 5518A, および 5519A/B(これらではヒーターが実際にチューブの「内部に」あります)、Excel 社製 1001、Zygo 社製 7705 などがあります。



安定化ゼーマン分離 2 周波数 HeNe レーザー

2 モード安定化軸ゼーマン分離 2 周波数 HeNe レーザーの機構図





Excel 社製 1001 レーザー



Zygo 社製 7705 変位測定装置

- **横方向:** 上述の 2 モードシステムと同様に、チューブ長は 1 対のモードがゲインカーブをまたぐように発振する長さとなりますが、ピーク時には 1 本のモードだけとなる長さです。ミラーシステムの本来の複屈折に関連する穏やかな横磁界が、数十から数百 kHz 範囲のビーム周波数をもたらします。モード位置によりビート周波数がわずかに変化するため、周波数安定化のために PLL フィードバックループ内でそれを使用します。一つの例は、Laboratory for Science 社製モデル 220 です。

(87) 一般的な研究用アプリケーション用のほとんどの商用安定化 HeNe レーザーはタイプ(1)=1, 2 本のモードによる安定化であり、周波数安定化のために 2 本の直交のモードで稼働しますが、一部は強度安定化のために 1 本のモードを使用します(あるいはスイッチでそれらを選択することもできます)。(いずれにしても、ただ 1 本の縦モード — 従って 1 つの光周波数 — がレーザーからの出射を許され、もう 1 本のモードは偏光子でブロックされます。)これらの中には、Coherent 社製 200、Spectra-Physics 社製 117 および 117A (そして同一の Melles Griot 社 05-STP-901)、Zygo 社製の多くおよび REO 社製の各種モデル、ソーラボ社製などがあります。例えば、Melles Griot 社製 05-STP-901 周波数安定および強度安定化 HeNe レーザー(生産終了品、現行品は PLT 社製 25STP910/912)では、レーザーキャビティが 1 対の直交偏光縦モードを発振させ、それらをゲインカーブ(周波数安定化のモード)の各側に跨がらせて非常に正確な制御を提供できますし、あるいはゲインカーブ(強度安定モード)の片側の出力に用いる単一縦モードを使用することもできます。他のメーカーの製品もそれらと一般的に類似しています。



Pacific Lasertec 社製 25STP912 安定化レーザーのヘッド部

(92) Agilent 社(以前は Hewlett Packard 社)、Excel 社で生産されたすべての干渉計レーザーと、Zygo 社 製のモデル 7705 は、タイプ(2)=ゼーマン分離による安定化です。しかし、Teletrac / Axsys 社、Optodyne 社、Renishaw 社および他社製はタイプ(1)=1, 2 本のモードによる安定化です。

そしてハイブリッドの手法もあります。例えば、Zygo 社製 7701/2/12/14 レーザーは 2 モード安定化を経由して単一周波数を生成してロックしますが、それはゼーマン効果ではなく、音響光学変調器(AOM)を使って 2 つに分離されます。



Zygo 社製 7701 変位測定装置

Hewlett-Packard 社製 5517 レーザーヘッドで使用されている(非常に単純な)ゼーマン分離安定化 HeNe チューブの数枚の写真については、「さまざまなヘリウム - ネオンレーザー」の下にある「レーザー装置ギャラリー(バージョン 1.86 あるいはそれ以上)」を参照ください。こうしたレーザーに関する詳細については、「Hewlett-Packard 社 / Agilent 社製安定化 HeNe レーザー」で始まる節を参照ください。 [Laser Equipment Gallery Link Page \(donkclipstein.com\)](http://donkclipstein.com/Laser-Equipment-Gallery-Link-Page)
[Sam's Laser FAQ - Commercial HeNe Lasers \(donkclipstein.com\)](http://donkclipstein.com/Sam's-Laser-FAQ-Commercial-HeNe-Lasers)

(98) 多くの縦モードで稼働する高価ではない HeNe チューブを単一波長レーザーに作り換えることは本当に可能ではありません。温度制御を付加することで、モードホップや偏光方向の変化という傾向を弱めることもできますし、強力な磁石の付加でも偏光ビームを強いることができます。しかし、単一縦モードの選択はチューブ内側へのアクセスなしでは難しいでしょう。ただし、HeNe チューブが十分短くて、モード間隔がネオンのドップラー広がりゲイン幅(約 1.5GHz)の 1/2 を超えるほどであれば、そのチューブは常にせいぜい 2 本の縦モードで発振するでしょう、これらの縦モードはそれぞれが直線偏光であり、互いに直交となるでしょう。そうなれば、安定化は非常に単純なハードウェアを使って可能となります。実際、たとえモード間隔が少し小さくなくても(500 MHz か 600MHz)、たった 2 本のモードがほとんどの時間に存在し、ただし(その 2 本のうちの)1 本がゲインカーブの中央に近づく、3 本目が出てくることもあります。これも受容可能な状況であり、その理由は、チューブが、(2 本の)モードがゲインカーブをまたぐという状態で安定化することができ、か

つ、たった 2 本のモードが発振するからです。強度安定化の場合、4 本のモードでも許容できる場合があります。留意すべきは、ランダム偏光の(複数の)モードと、直線偏光のチューブは同様である(偏光を除いて以外)と同時に、1 本のランダム偏光のチューブは 2 本のモードが提供する利点を持つ 2 本のモードを維持するチューブを使用することが望まれ、かつ、出力ビームから 2 本目のモードを排除することが可能であるという点です。詳細については「高価でない手製の周波数安定化あるいは強度安定化 HeNe レーザー」節を参照ください。 [Sam's Laser FAQ - Home-Built Helium-Neon \(HeNe\) Laser \(donklipstein.com\)](http://www.donklipstein.com/SamsLaserFAQ-Home-Built-Helium-Neon-HeNe-Laser)

(108) 放電電流の制御に加えて、外部で実行できることとの組み合わせも可能であり、より長いチューブでもたった 1 本あるいは 2 本のモードとして適切なゲインとなる状況を強いることもできます。この手法が多くの縦モードで通常に発振する HeNe チューブ向けの信頼できる長期に亘る手法としてこれまであり得たかどうかは疑わしいです。私がそれほど成功していないと思うものは、出力側ミラーを通して光を戻すような光学的手法です。この手法を選択すると、おそらく必要とされる効果のまさに正反対の効果をもたらすこととなるでしょうが、特殊な場合には(それは「注入同期」と呼ばれ、他のアプリケーションでは大きな成功を収めています)機能することもあります。

(112) Coherent 社、Melles Griot 社、Spectra-Physics 社および他のメーカーでは、\$5,000 かそこらで小型の独立型の安定化 HeNe レーザーを販売しており、Agilent 社(HP 社)と他のメーカーは干渉計やこの種のレーザー(さらに高価な!)を含む他の類似した装置を製造しています。他のメーカーには Zygo 社、Teletrac 社、ニコン社、Micro-g Solutions 社、SIOS 社、NEOARK 社および REO 社が含まれます。私が見てきたラボ向けレーザーの全ては発振器長全体での熱フィードバック制御を持つ短い HeNe チューブを使用しており、それら全ては赤色 HeNe 波長(632.8xxxxxxnm ないし 8 桁を超える精度で)で稼働します。ひとつの典型的なシステムについて、「Coherent 社製モデル 200 単一周波数 HeNe レーザー」節で説明されています。Spectra-Physics 社製モデル 117A/118A レーザーは、実のところ古い食料雑貨店などでのバーコード決済用スキャナーの心臓部として使用されていたチューブと類似した低品質の SP088-2 チューブを使用しています。こうしたチューブは Spectra-Physics 社製モデル 117 の OEM 安定化 HeNe レーザー組立品の内部で確認できます。ただし、一部の機種は内部ヒーターを装備するカスタム仕様のチューブを採用しており、外部への熱発散を減らしています。緑色や他の可視の HeNe 波長や赤外波長の 1 つを用いる安定化 HeNe レーザーも、同じ技術を採用して製造することができます。 [Sam's Laser FAQ - Commercial HeNe Lasers \(donklipstein.com\)](http://www.donklipstein.com/SamsLaserFAQ-Commercial-HeNe-Lasers)



Spectro Physics 社製 117 レーザーの内部写真

(120) 上述のように、汎用の安定化レーザー用の実際の安定化メカニズムは、2 本の縦モードの振幅の比率(周波数安定化に好適)か、あるいは 1 本のモードの強度(強度安定化に好適)でしょう。これらは通常、109 の一部まで安定しています。ただし、強度安定時の周波数ドリフトはそれほど正確ではなく、108 の一部未満となるでしょう。強度安定時には出力変動は 0.2% でしょうし、周波数安定時には出力変動は 1% となるでしょう。一部の機構ではスイッチでの選択が可能と

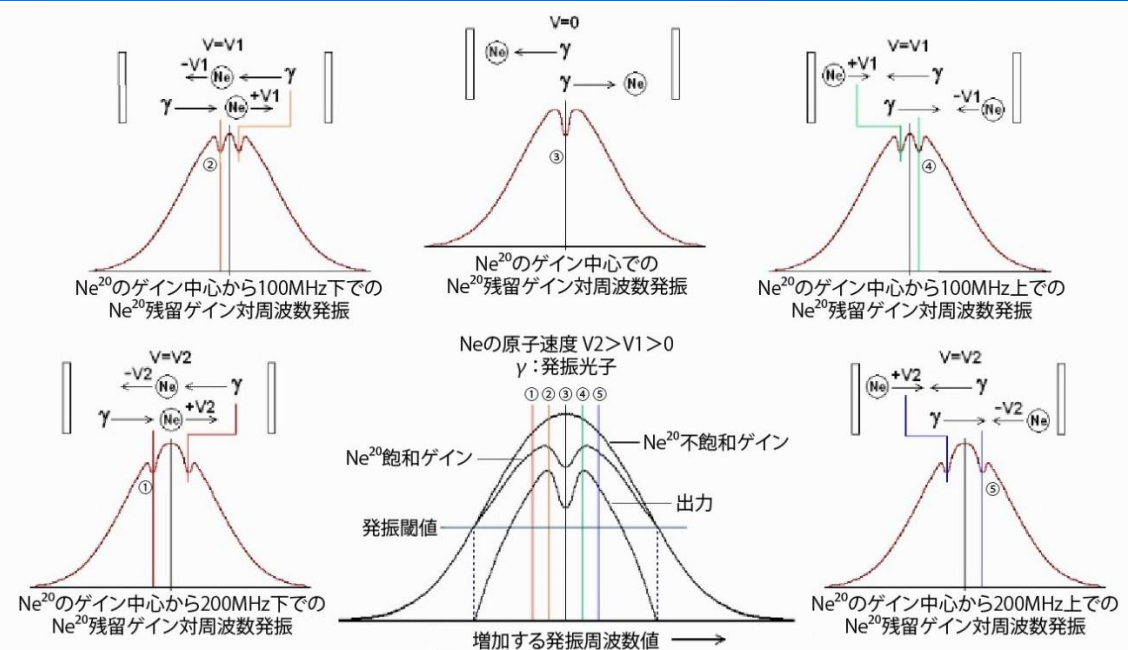
なっており、外部調整入力を加えることで数百 MHz に亘る周波数を変化させることができます。(ただし、最もよく採用される熱制御故に、反応時間が早いとは、本当に言えません。)

(126) ゼーマン分離干渉レーザーはクォーツ時計に周波数差をロックすることができますが、ただし、安定化には基本となる偏光モードを用いているように見え、ゼーマンビート(うなり)は干渉計用の参照値としてのみ利用しているようです。「Hewlett-Packard 社/Agilent 社製安定化 HeNe レーザー」で始まる節を参照してください。少数のモデルは、PLL にゼーマン周波数をロックします。これらの内の一つが Laboratory for Science 社製モデル 220 でした。(Laboratory for Science 社は既に倒産しています。)[Laboratory for Science 社製安定化 HeNe レーザー]の節を参照してください。もう1つの例は「NEOARK 社製モデル 262 横ゼーマンレーザー」です。 [Sam's Laser FAQ - Commercial HeNe Lasers \(donkclipstein.com\)](http://www.donkclipstein.com/SamsLaserFAQ-CommercialHeNeLasers) [Laboratory for Science Model 220 Ultra-Stable Laser \(repairfaq.org\)](http://www.repairfaq.org/LaboratoryforScienceModel220UltraStableLaser) [安定化レーザー | ネオアーク株式会社 \(neoark.co.jp\)](http://www.neoark.co.jp)



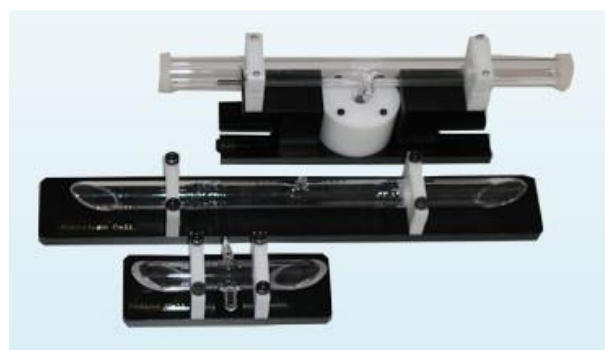
NeoArk 社製ヨウ素安定化レーザーの最新型の外観

(133) より精度が高く、より低い長期ドリフトを持つより洗練された機構は、ネオンゲインカーブの中心にある「ラムディップ(ラムくぼみ)」か、ガスセルのヨウ素蒸気の他のタイプの超微細吸収線の1つにロックして、1010 の一部の桁かそれ以上の安定性を達成することができます。「ヨウ素安定化 HeNe レーザー」の節を参照ください。 [Sam's Laser FAQ - Helium-Neon Lasers \(donkclipstein.com\)](http://www.donkclipstein.com/SamsLaserFAQ-Helium-NeonLasers)



条件: 同素体として純粋なガス (Ne^{20})、短い半球状ファブリーペローキャビティ、単一縦モード

HeNeレーザーでのラムディップくぼみのいろいろ



NeoArk 社製ヨウ素ガスセルの外観

(135) 安定化 HeNe レーザーの性能、簡潔さ、信頼性および比較的低コスト故に、それらは多くのアプリケーションで今でも優先される周波数参照となっています。上述したとおり、通常システムで\$5,000 ほどでしょう。この金額は高く見えるかもしれませんが、多くの他の技術と比較すると低額です。価格は高価なコンポーネントや複雑な製造の結果ではなく、製造されるユニットの比較的限られた数の結果と言えます。安定化 HeNe レーザーがレーザーポインターと同じぐらい人気が高ければ、それらはおそらく\$100 未満でしょう。

さらなる詳細と実際のシステムの特定の詳細については、「商用の安定化 HeNe レーザー。」の章で見つかるかもしれません。 [Sam's Laser FAQ - Commercial Stabilized HeNe Lasers \(repairfaq.org\)](http://www.repairfaq.org/Sam/Laser/FAQ/CommercialStabilizedHeNeLasers.html)