

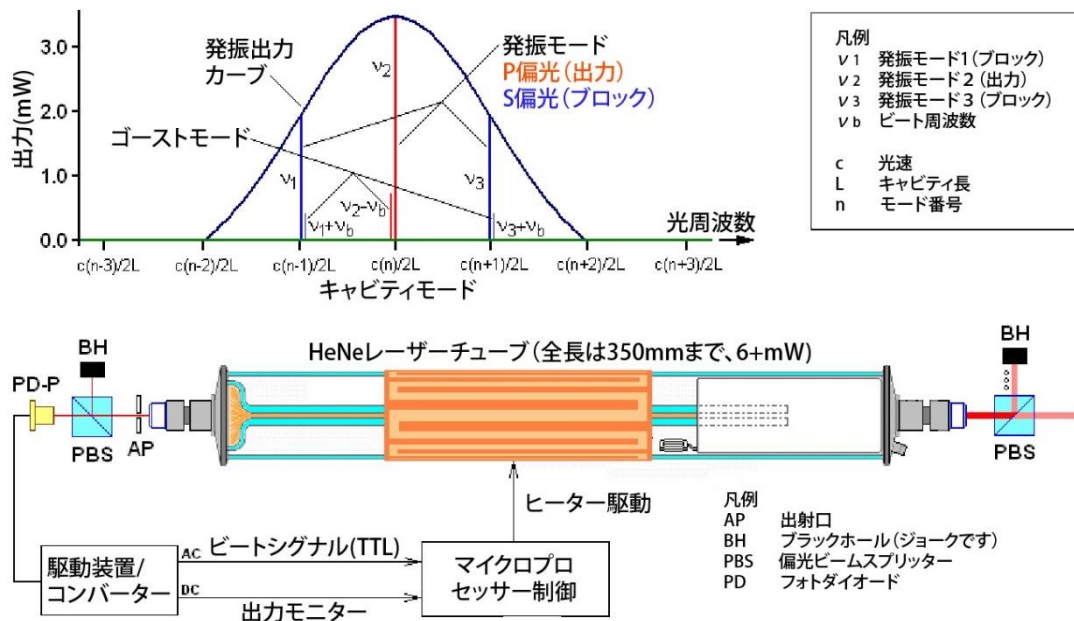
③ 安定化 HeNe レーザーのロック技術

安定化 HeNe レーザーをロックインする目的は、目的の出力（ほとんどの場合、単一または 2 つの周波数）が確実に制御されるようにすることです。光周波数または周波数。計測用途で使用する場合、これは、単一またはデュアルのレーザー発振ラインが既知の光周波数（ c/f に関連する既知の波長に対応します。 c は光速、 f は光周波数）に固定されることを意味します。したがって、ロックコントローラーには、「組み込みまたは外部の」参照が必要です。固有参照は、レーザー自体のプロパティを使用します。外部参照には、別のレーザー（それ自体が既知の光周波数にロックされている）、光周波数に関して既知のスペクトル吸収を持つガスセル、または超高フィネスのファブリーペローエタロンまたは干渉計のような物理デバイスなど、何らかの外部デバイスが必要です。以下の表は、赤色（633nm）HeNe レーザーの最も一般的なロック技術をまとめたものです。

ロック手法	最大出力	光学周波数 変動	光学周波数 精度
不安定な複数横モード	>200 mW	–	–
不安定な単一横モード	>50 mW	1.5 GHz	3×10^{-6}
熱安定化	2 mW	75 MHz	1.5×10^{-7}
単一モード強度安定化	1.5 mW	10 MHz	2×10^{-8}
ゲインピーク安定化	1.0 mW	5 Mhz+	1×10^{-8}
ラムディップ安定化	0.5 mW	5 Mhz+	1×10^{-8}
2モード偏光安定化	2.0 mW	1 MHz	2×10^{-9}
3モード安定化	3.5 mW	1 MHz*	2×10^{-9}
二次ビート安定化	3.5 mW	200 kHz*	4×10^{-10}
横ゼーマンビート安定化	1.5 mW	100 kHz*	2×10^{-10}
外部（ヨウ素セル）安定化	0.2 mW	<5 kHz+	$<1 \times 10^{-11}$
外部（ヨウ素セル）オフセットロック	3.5 mW	200 kHz*	4×10^{-10}
外部参照安定化	2.0 mW	<1 Hz	$<2 \times 10^{-15}$

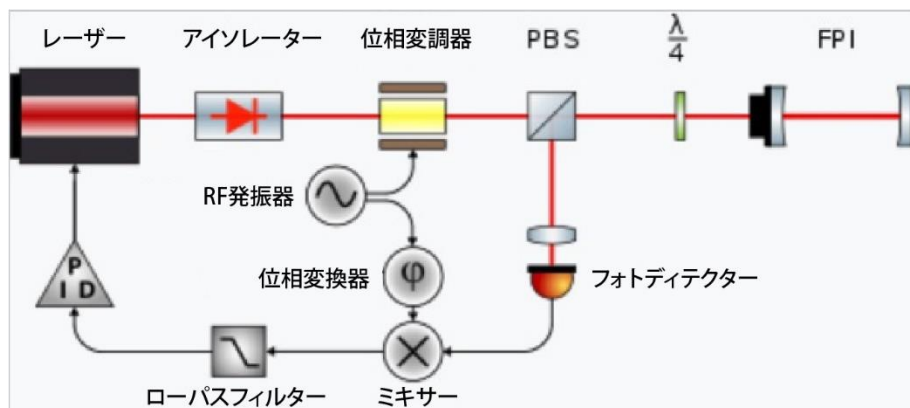
これらの有用な出力は、レーザーのダイナミクスによって制限される完全に純粋な単一モードまたは単一の光周波数であるとは限りません。

* は、出力が光周波数内で近接した同様の振幅の 1 対のモード、またはメインモードの隣に小さな「ゴーストモード」を持つ技術を示します。



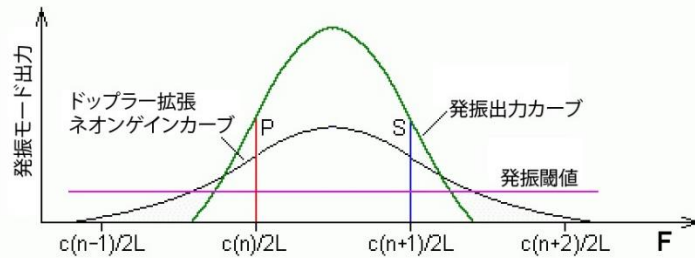
2次ビート安定化を用いる3モード HeNe レーザーの機構図

+ は、パウンド・ドレバー・ホール (Pound Drever Hall) ・ロックまたは光周波数にディザを追加する同様の実装に基づく技術を示します。

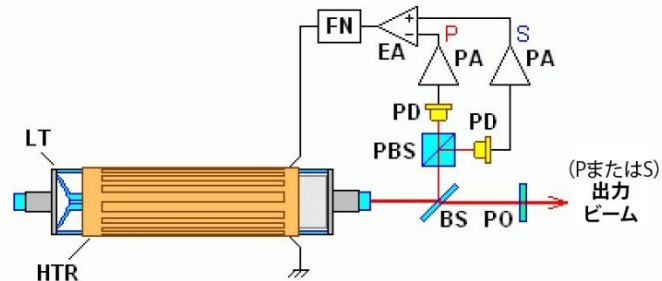


パウンドドレバーホール (PDH)ロックシステムの機構図

最初のグループにリストされているアプローチは固有のものであり、HeNe レーザー管のネオン利得曲線 (NGC) を基準として使用します。NGC の中心には、ネオン同位体比、温度、圧力のみ依存する光周波数があり、これらはすべてかなり正確に制御できます。NGC のゲイン帯域幅も(このように) 1.6GHz 付近と比較的狭いため、発振する縦モードの数を制限し (詳細は後述)、プロファイルを使用したフィードバックをより正確にすることができます。したがって、NGC を使用して、レーザー発振ラインを既知の位置に正確に配置できます。最も珍しい (そして高価な) 安定化 HeNe レーザーを除くすべては、上記の NGC に基づく固有の技術の 1 つを使用します。大部分はシングルまたは 2 モードの偏波安定化を使用します。

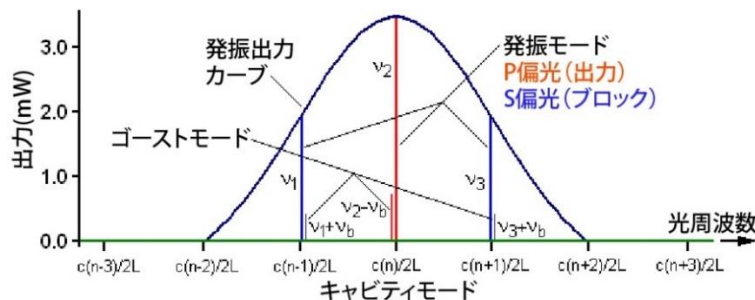


略語凡例	
BS	ビームサンプラー
EA	エラー増幅器
FN	フィードバックネットワーク
HTR	ヒーター
LT	レーザーチューブ
PA	プリアンプ
PBS	偏光ビームスプリッター
PD	フォトダイオード
PO	偏光子

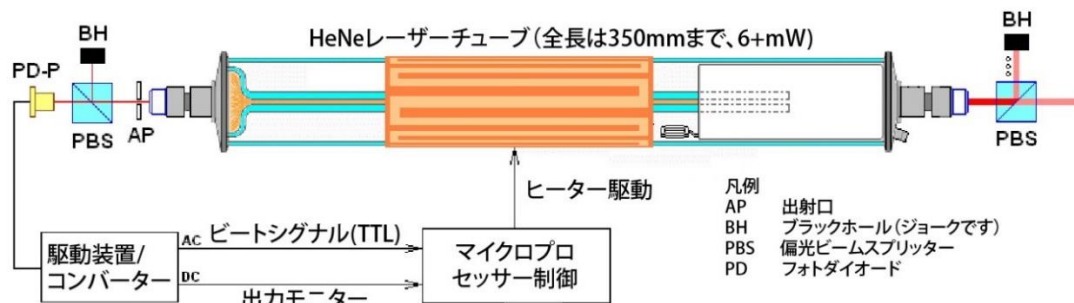


2 モード安定化単一周波数HeNeレーザー

外部 F-P 共振器または他のタイプの干渉計を使用した比較的単純なアプローチが可能です。たとえば、低フィネスの走査ファブリペロー干渉計(SFPI)を使用して、NGC 上の特定の位置に縦モードを維持するデジタル制御ループで縦モードを監視すると、3 モードの偏波安定化と併用して、1 つのモードを中心にしてより高いパワーを得ることができます。シングルモードおよびデュアルモードの偏波安定化は最大約 2mW に制限されます。3 モード安定化は、最大約 3.5mW かそれ以上の出力が可能です。しかし、これは依然として固有のテクニックです。(これは、シングルモードまたはデュアルモードの安定化にも使用できますが、メリットがあるとしても、おそらくそれほど多くはありません。)

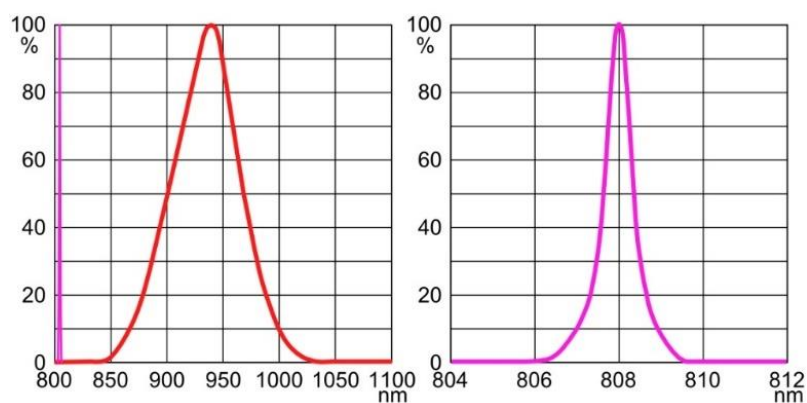


凡例	
v1	発振モード1 (ブロック)
v2	発振モード2 (出力)
v3	発振モード3 (ブロック)
vb	ビート周波数
c	光速
L	キャビティ長
n	モード番号

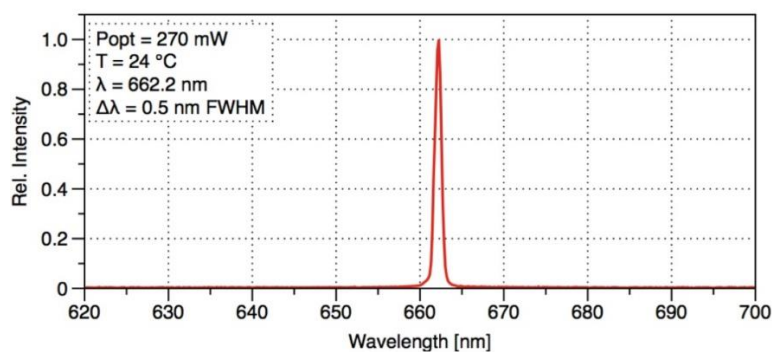


2次ビート安定化を用いる3モード HeNe レーザーの機構図

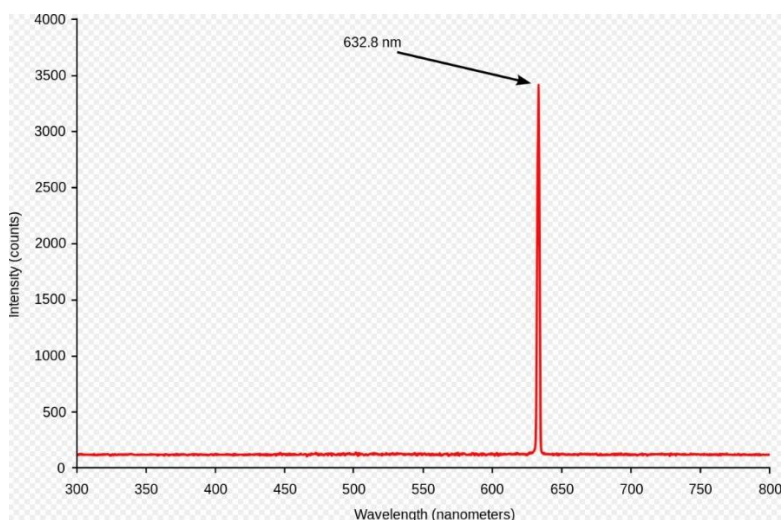
NGC が非常に役立つのは、ネオンの利得帯域幅が 1.6GHz と比較的狭いためであることに注意してください。一方、固体 (SS) レーザーは、通常 50 倍以上広い発振媒体利得帯域幅を持っています。単純な技術を使用して SS レーザーに単一モードを強制することはできますが、このような広い利得帯域幅で光周波数を正確に制御することはより困難です。これが、光周波数の精度と安定性を必要とする用途において、SS レーザーがまだ性能の低い HeNe レーザーを置き換えることができない主な理由の 1 つです。ダイオードレーザーを特定の光周波数にロックすることはさらに複雑です。



赤外 LED (左) と近赤外 LD レーザー (右) のスペクトル



DPSS レーザーのスペクトル



HeNe レーザーのスペクトル

外部技術の中で、ヨウ素セルを利用した安定化 HeNe レーザーは、おそらく市販されている最も正確な光周波数基準です（それに匹敵する価格も同様に高い）。その絶対的な光周波数精度は、現在および過去のほとんどの市販の安定化 HeNe レーザーで使用されている 2 モード偏波安定化技術よりも 2 桁優れている可能性があります。



ヨウ素安定化レーザーの一例

このレベルの精度を超えて、高精細な F-P 共振器などを開発することは、一般に高度な研究の範囲です。1Hz 未満に下げるには、振動やその他の外部影響を最小限に抑えるために、大規模な隔離チャンバーとアクティブなダンピングが必要です。このようなシステムは移植可能ではありません。☹

このチャートでは、単一周波数動作を強制するためにエタロンなどのキャビティ内デバイスの使用を必要とする技術は除外されています。これらは高出力と高安定性の両方が可能ですが、特殊なチューブと比較的複雑な制御が必要です。したがって、それらは高価であり、まったく一般的ではありませんが、少なくとも 1 社が 40mW の単一周波数 HeNe レーザーを提供していると主張しています。

そうは言っても、かつて食料品店のバーコードスキャナーで使用されていたものと同様の一般的な HeNe レーザー管の動作を制御して、1億分の 1 よりも優れた安定性を備えた単一周波数出力を提供することは、驚くほど簡単で、ほとんど簡単です。実際、これは（レーザー管と電源を除けば）わずか数ドルの合計 4 つの部品で実現できます。考えられるほぼすべての技術が過去のある時点で研究されてきました。訓練された鳩がこの目的のために強制的に使用されている可能性も十分にあり、おそらくそれに関する特許があるでしょう。☹ ここで説明するのは、最も一般的な（電子的な）アプローチのみです。

ただし、これらのいずれかをより詳細に説明する前に、入門またはレーザーモードが必要です。